



Матвеев Б.А.

Что мы понимаем под термином «ИнфраКрасная опто(электро)ника»?

«Фотометрия»?

«Фото(электро)ника»?

«Информационная оптика»?

«Фотоника»?

«ОптонИКа»?!

«ИКоника»?!

«Инфракрасная оптоэлектроника»

Кафедра (1973)

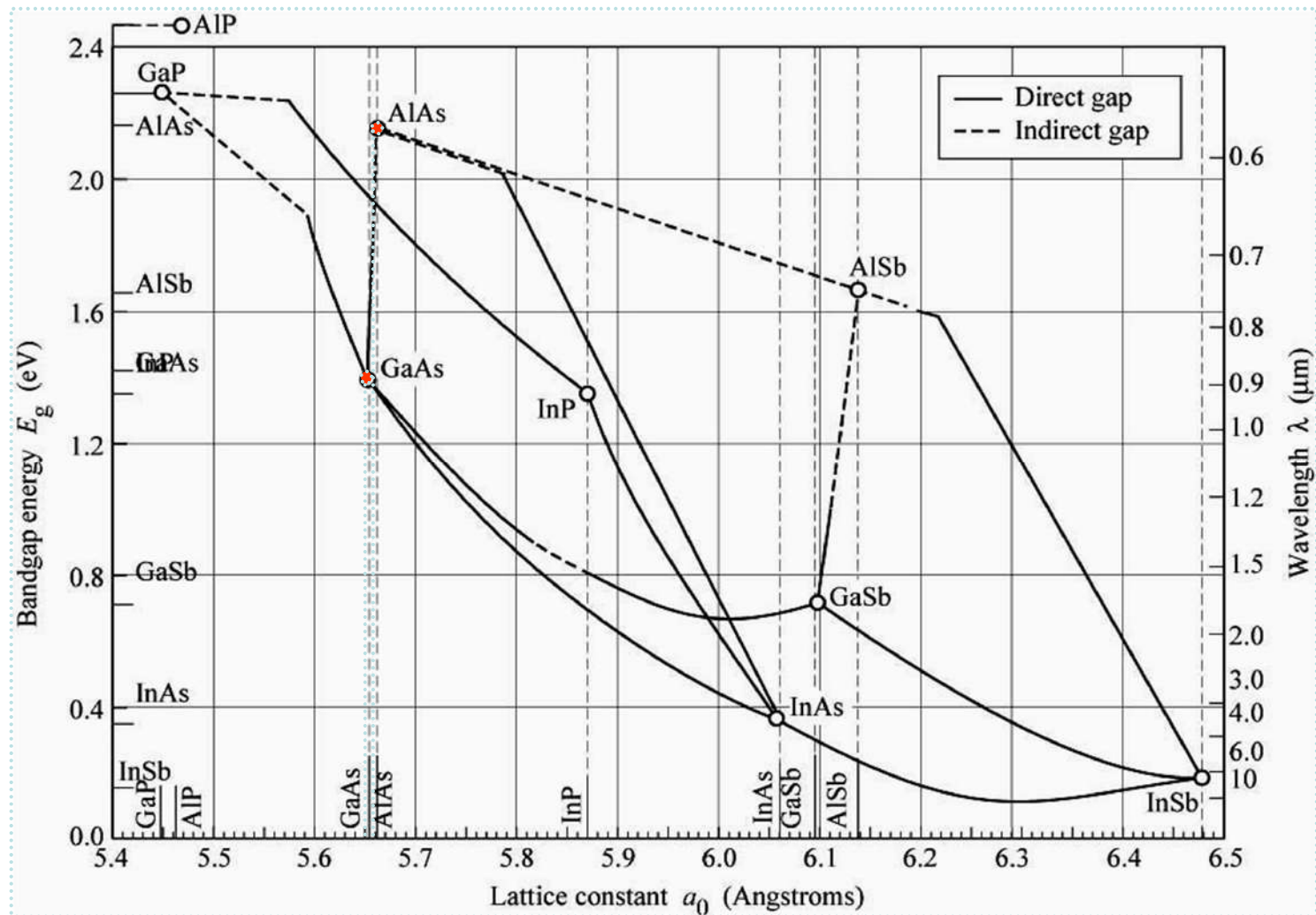
Диссертация (2010)

Лаборатория (1995)

- 1. С чего все начиналось**
- 2. Мечты, мечты...**
- 3. Мечты сбываются!!!**

1. С чего все начиналось
2. Мечты, мечты...
3. Мечты сбываются!!!

A³B⁵ family



Ленинская премия 1964 года — за участие в фундаментальных исследованиях, приведших к созданию полупроводникового квантового генератора.



(Фото из газеты «Ленинградская Правда» от 23 апреля 1964 года)

«Благодаря тому, что излучение, создаваемое лазерами, обладает такими необыкновенными свойствами, эти приборы незаменимы для решения ряда задач. Даже простое перечисление областей применения заняло бы целую страницу. Вот некоторые из них. Они могут быть использованы в спектроскопии, для передачи энергии в космосе на

большие расстояния, **для связи с космическими**

кораблями и управления ими, для сварки и резки металлов, геодезических и метеорологических измерений. Блестящие перспективы открывают лазеры в медицине и биологии. Лазерный луч в будущем заменит нож хирурга. И это будет не только самый тонкий и острый нож, но и самый стерильный, которым можно и резать и сшивать».

Г.Мишин, Ю.Стволинский, Газета «Ленинградская Правда», № 65 (14926) от 17 марта 1964 года

Наследов Дмитрий Николаевич, Бурдуков Юрий Михайлович
Гос. Премия СССР за
«Работы по получению монокристаллов арсенида галлия и исследование
их свойств» (1974)

Czochralski
growth method

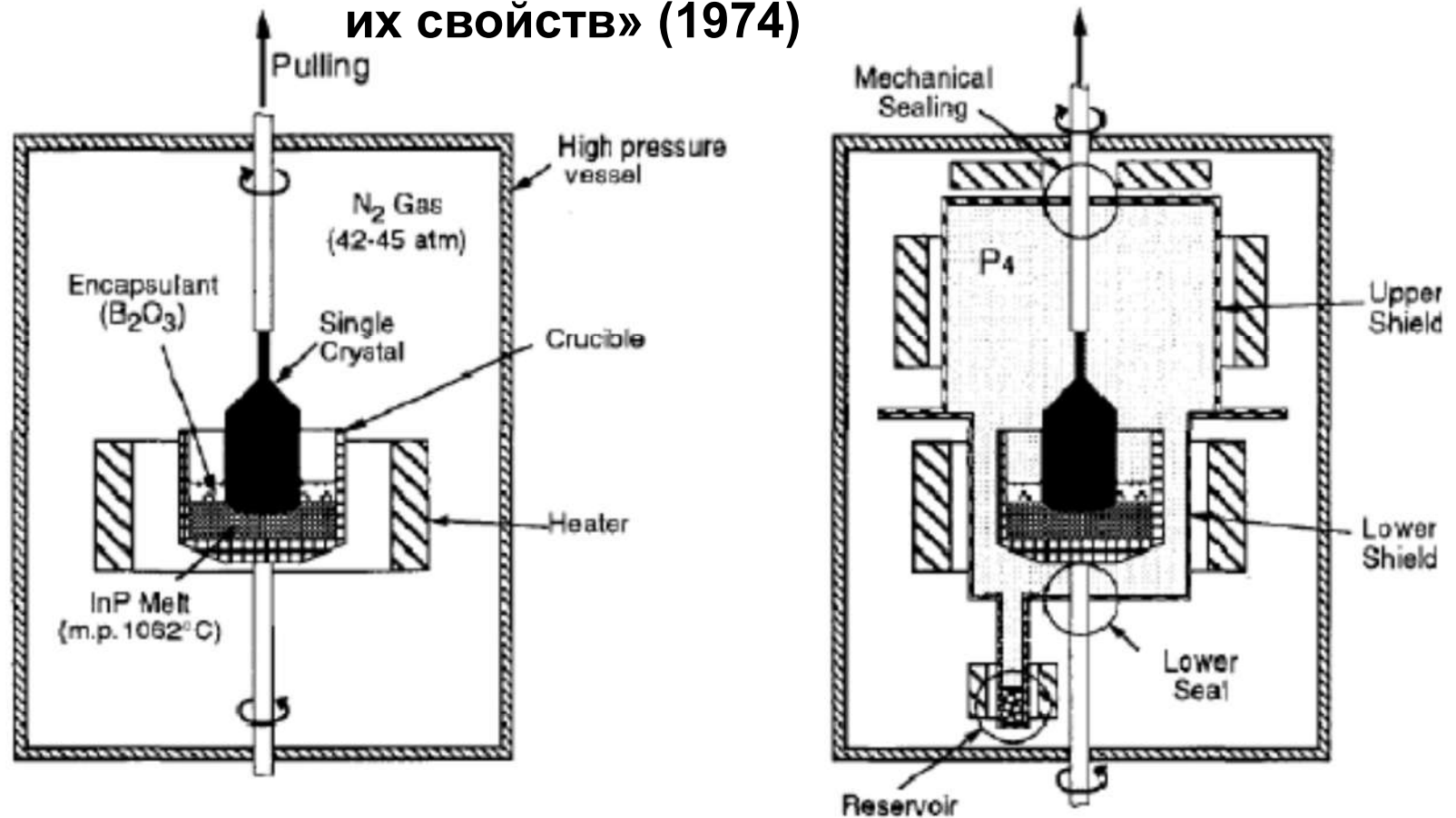


Fig. 1.1. Schematic diagram of: left) the Liquid Encapsulated Czochralski growth chamber and right) Vapor Pressure Controlled Czochralski growth chamber used in large size InP wafer growth. [Reproduced with permission from Journal of Crystal Growth Vol. 158, No. 3, Kohiro, K., Ohta, M., and Oda, O., "Growth of long-length 3 inch diameter Fe-doped InP single crystals," p. 197, Fig. 1 Copyright 1996 Elsevier Science B.V.]

Модификация спектра излучения СД на основе InAs при его прохождении через газовую смесь, содержащую метан

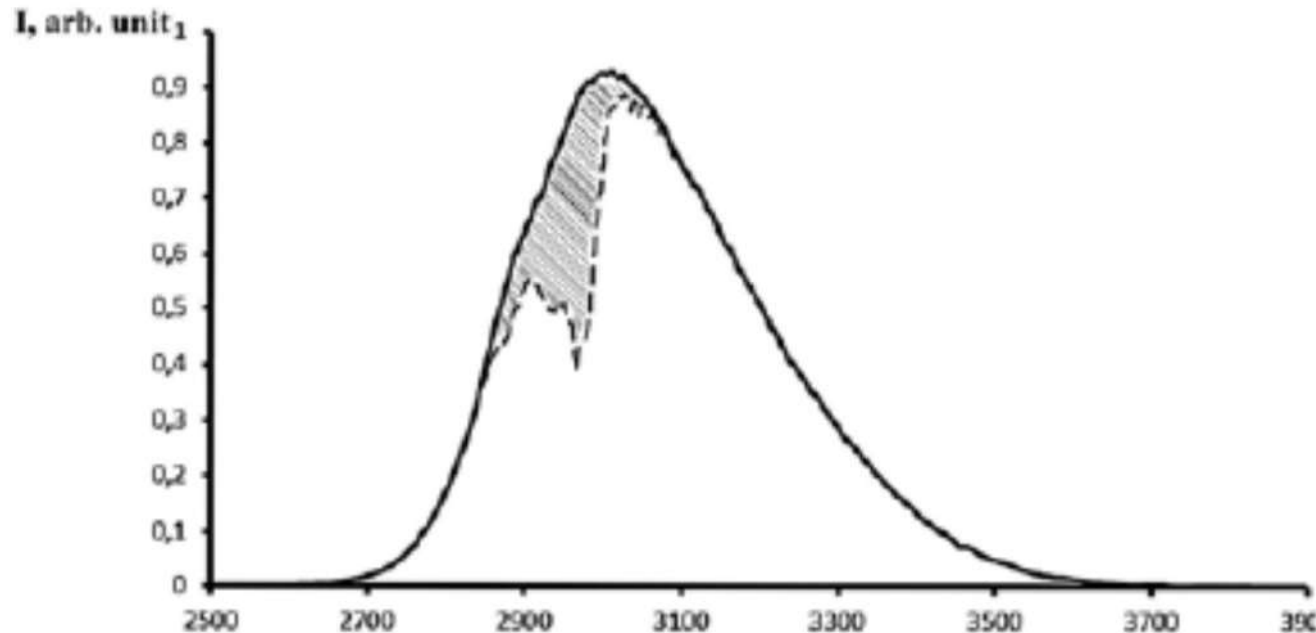


Рис.2 Спектр СД на основе InAs до прохождения его излучения через среду, содержащую метан (сплошная кривая) и произведение спектра СД на спектр пропускания воздушно-метановой смеси [6].

С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, «Источники спонтанного излучения на основе арсенида индия (обзор: десять лет спустя)», ФТП, т.53, п2, стр. 147-157 (2019)

Применительно к сенсору, имеющему в своем составе узкополосный фотодиод (ФД) и СД, параметры которых в интервале длин волн (λ_1 - λ_2) могут зависеть от их температуры (Т), закон Бера-Ламберта может быть применен для вычисления передаточной функции сенсора [5]:

$$\tau(C, L, T) = \frac{U(C, L, T)}{U_0(L, T)} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda, T) \cdot \exp[-\alpha(\lambda) \cdot L \cdot C] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} A(\lambda, T) d\lambda}, \quad (1)$$

где $A(\lambda, T) = S_{PD}(\lambda, T) \cdot I_{LED}(\lambda, T)$ - аппаратная функция сенсора, $S_{PD}(\lambda, T)$ -

чувствительность ФД, $I_{LED}(\lambda, T)$ - интенсивность излучения СД,

$\alpha(\lambda)$ - спектральный коэффициент поглощения газа, заимствованный, например, из базы данных HITRAN.

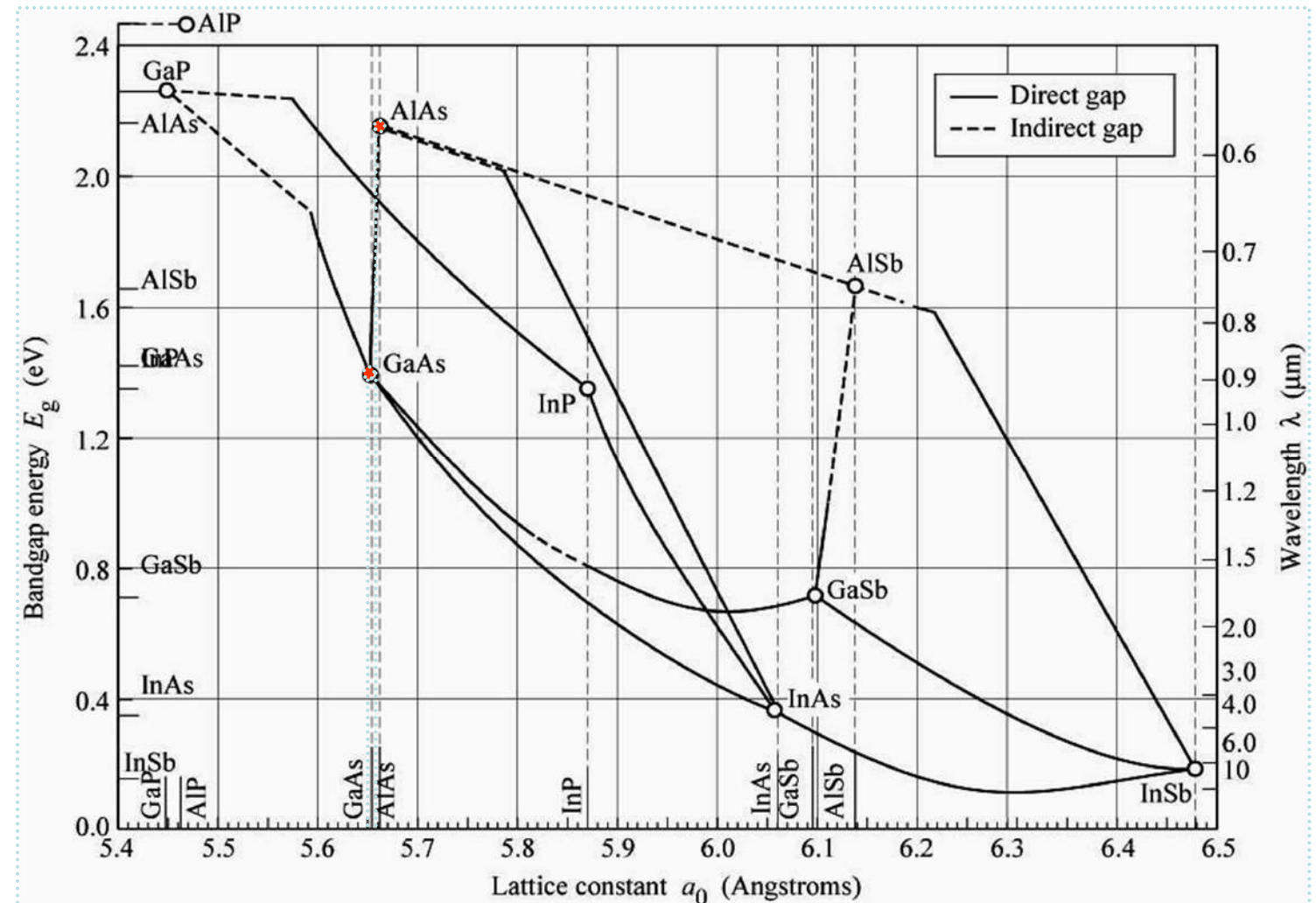
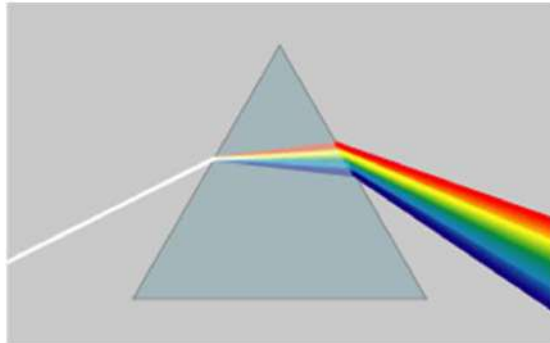
L - длина взаимодействия излучения СД с газом, C - концентрация газа в исследуемом воздухе.

$U(C, L, T)$ - выходной сигнал ФД при наличии газа,

$U_0(L, T)$ - выходной сигнал ФД без газа.

С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, Г.Ю. Сотникова,
«Диодные оптопары на основе InAsSb для сенсоров углекислого газа, работающих в режиме реального времени»,
Журнал технической физики, 2018, том 88, вып. 9, стр. 1433-1438.

A³B⁵ family



Lattice mismatched heterostructures

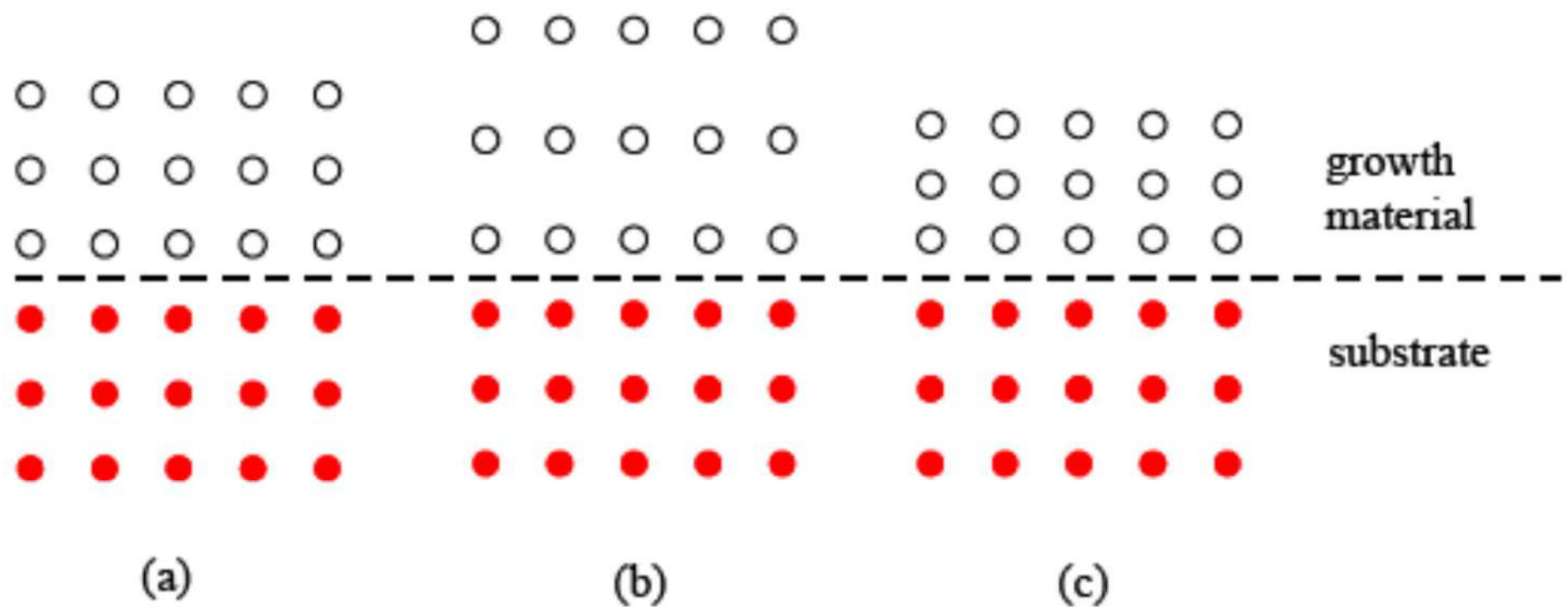
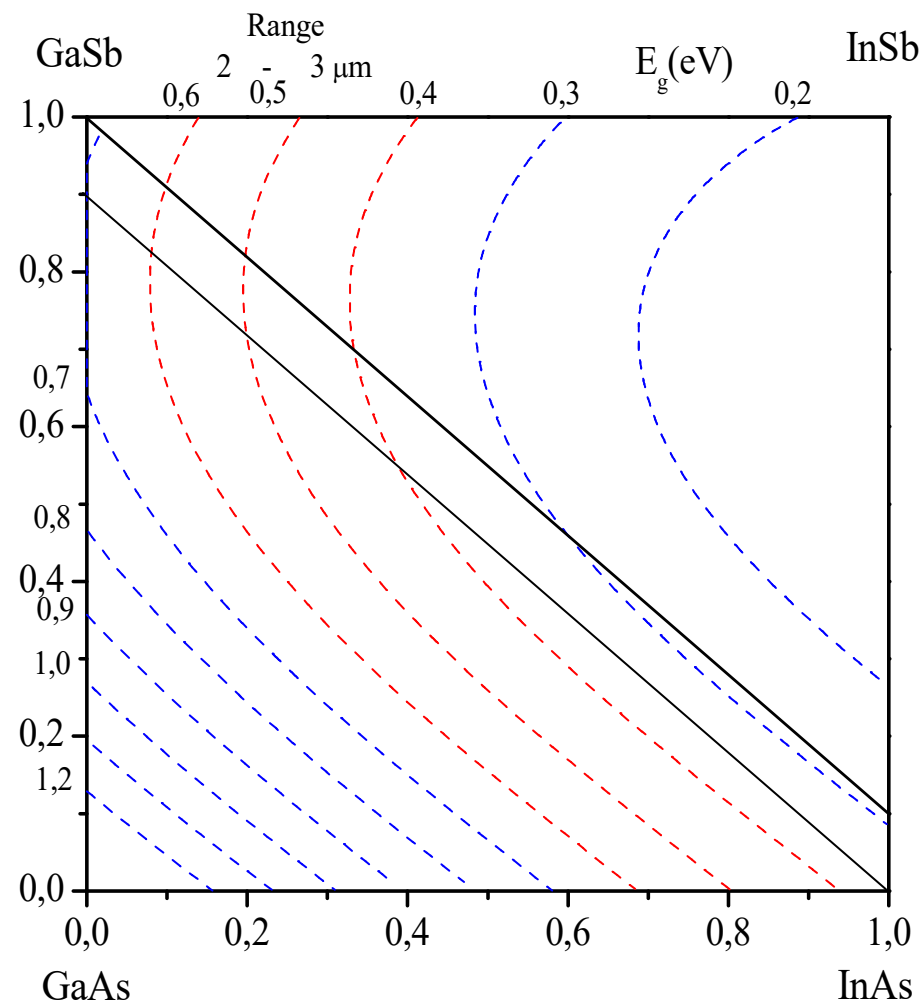
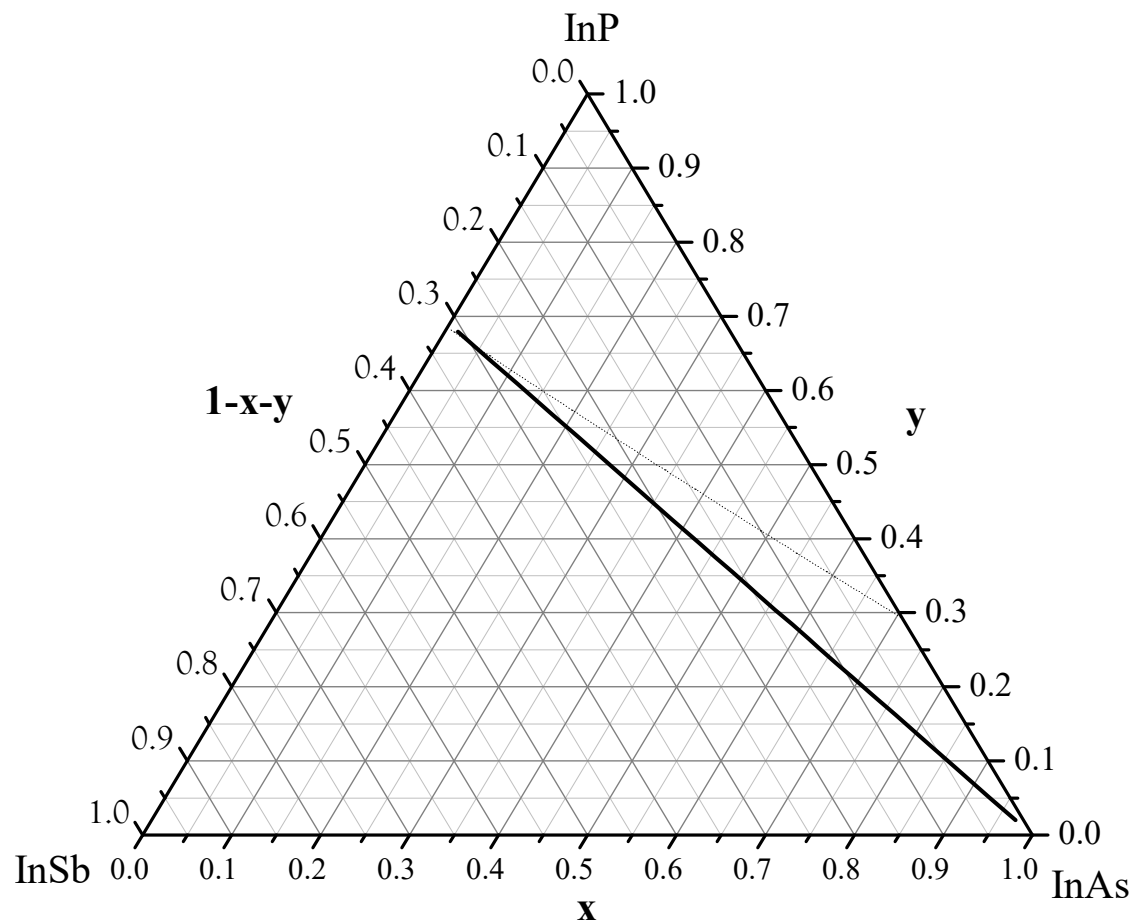


Fig. 7.6. Schematic diagram of lattice matched (a) and strained (b, c) heterostructures.

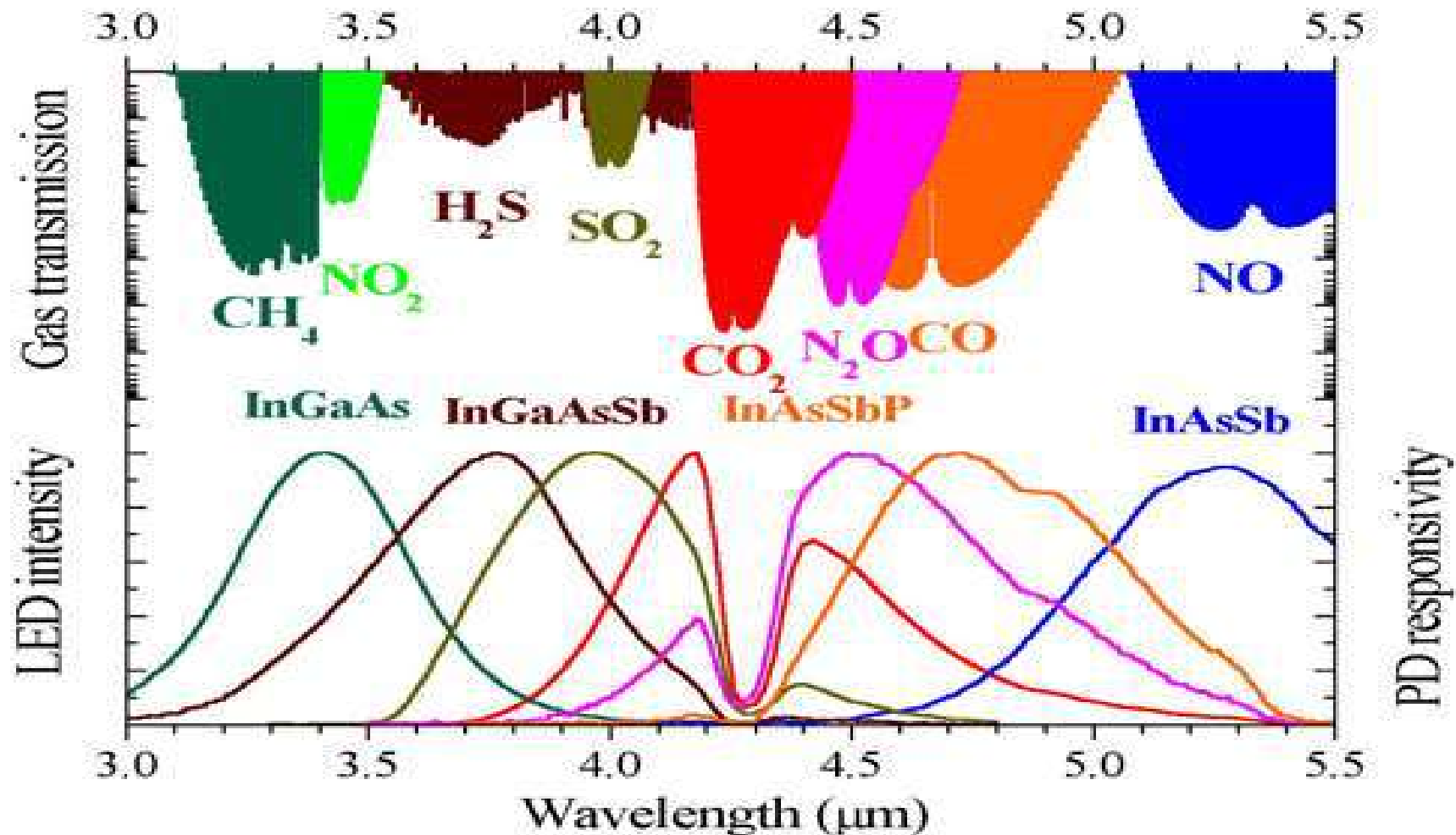
A3B5 alloys

$\text{InAs}_{1-x-y}\text{Sb}_x\text{Py}_y$,

$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_{1-y}\text{As}_x\text{Sb}_y$

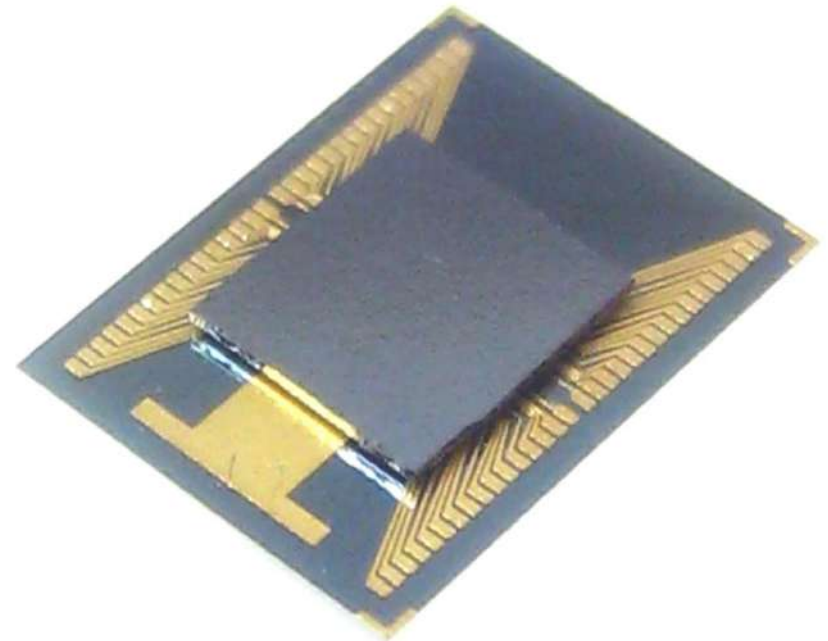
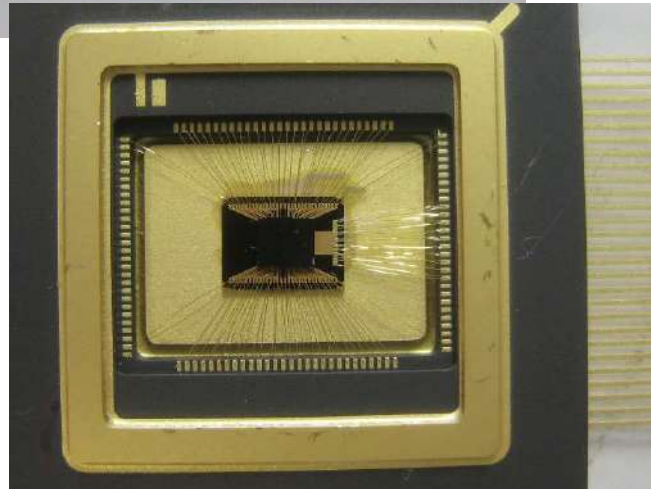
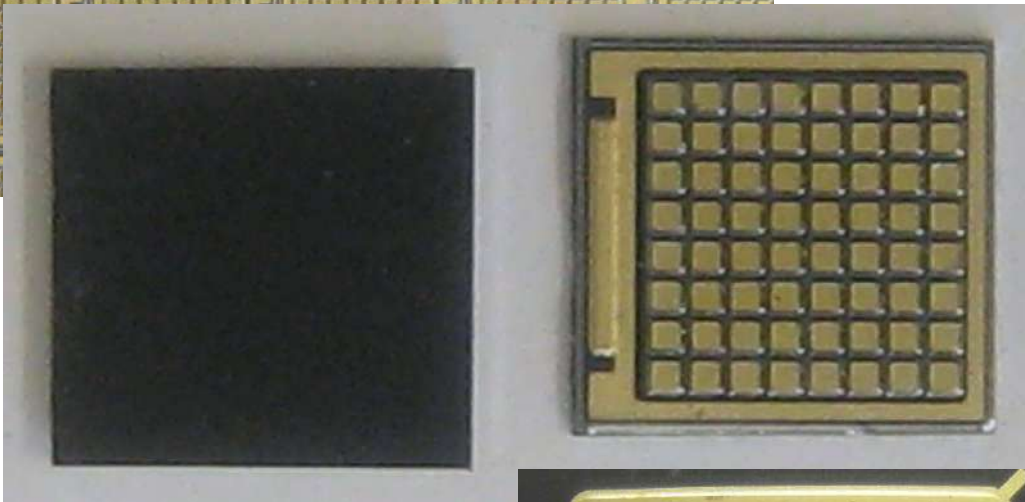
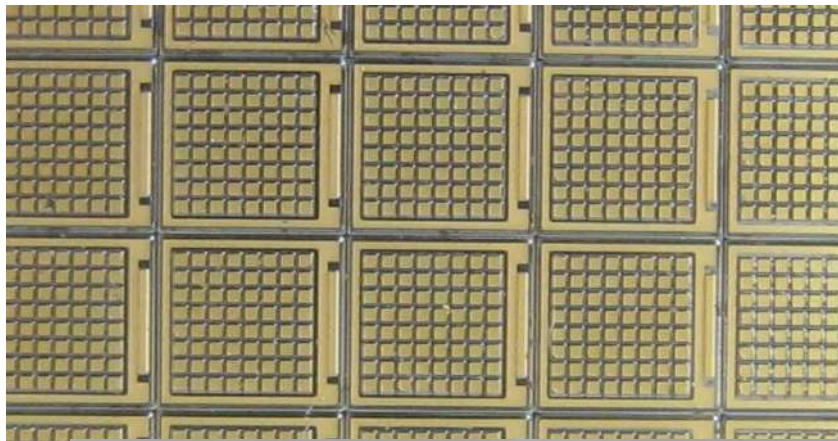


LED/PD spectra in Mid-IR are broad compared with gas absorption bands – spectral selection is needed



Матрица 8×8 на основе InAs ($\lambda=3.4$ мкм)

P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova, "P-InAsSbP/n-InAs single heterostructure back-side illuminated 8 x 8 photodiode array», Infrared Physics & Technology 78 (2016) 249–253



Типы охлаждаемых ФД на основе InAs(Sb)/InAsSbP, разработанных в ФТИ

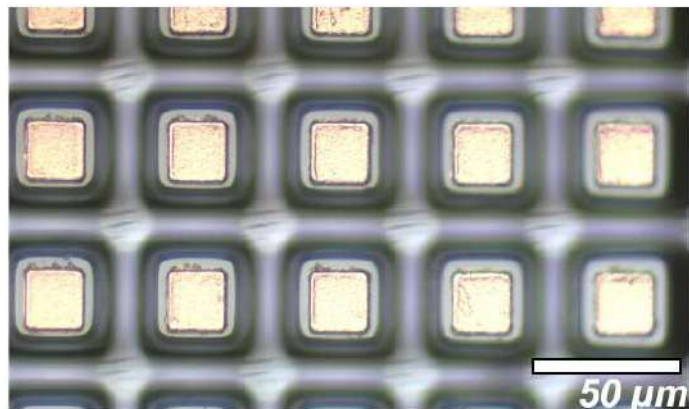
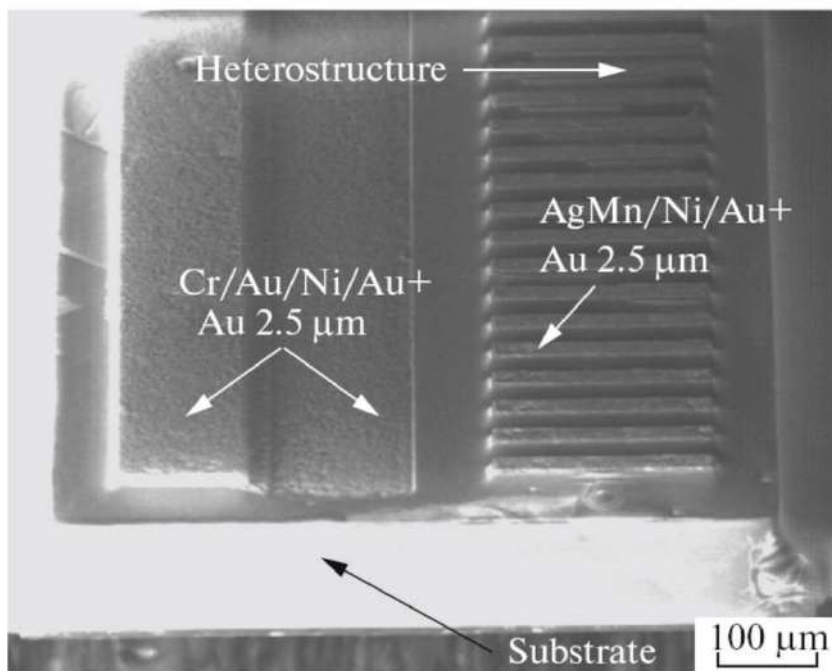


Fig. 3. Photo of the epi-side/contact side of the 8×64 PD array.
Infrared Ph.Tech. 2018



ФТП, 2016

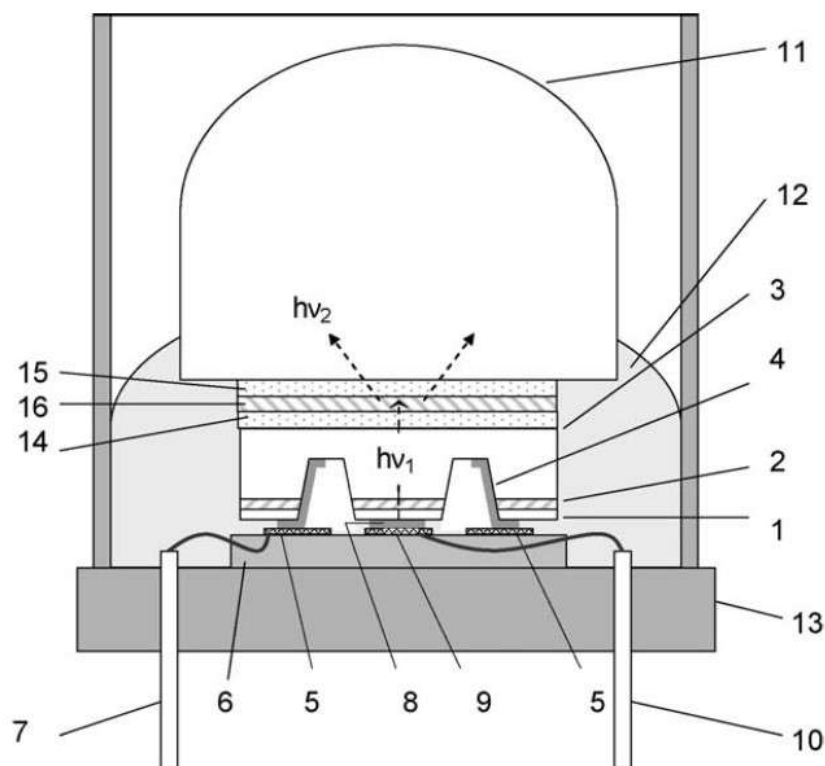
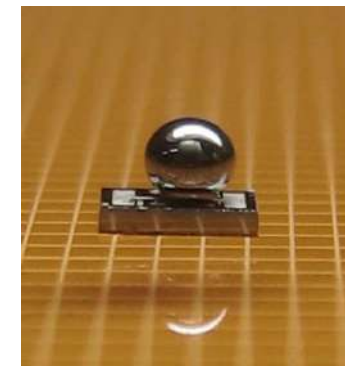
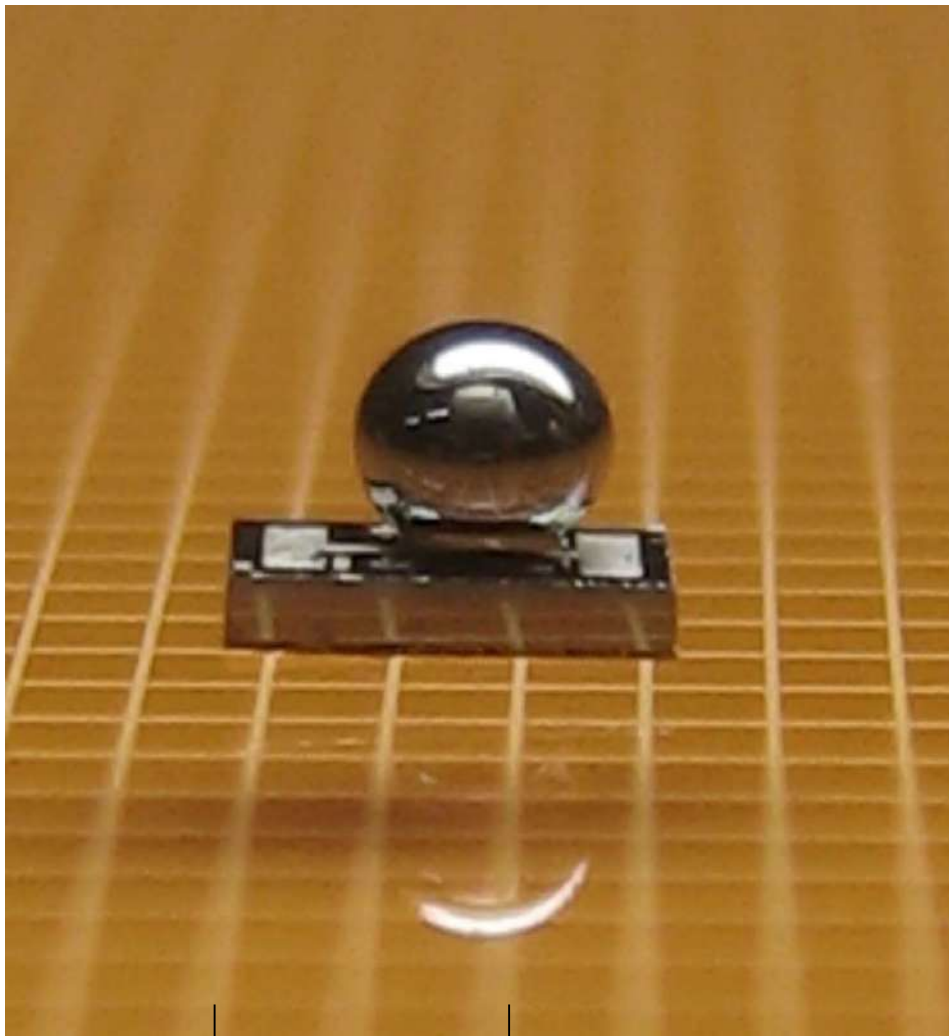


Fig. 1. Schematic of III-V mid-IR LEDs. 1-p-type contact layer, 2-n-type narrow gap layer, 3-outcoupling substrate surface, 4-cathode contact, 5-cathode pad onto Si submount, 6-Si submount, 7-negative electrode, 8-anode contact to mesa area, 9-anode pad onto Si submount, 10-positive electrode, 11-Si hyperhemispherical lens, 12-epoxy encapsulation, 13-header. *Optically pumped LED*: 3-GaAs, 13-TO-39 package, 14, 15-optical glue, 16-InSb "phosphor", $h\nu_1 > h\nu_2$. *Electrically pumped LED*: 1-p-InAsSbP, 2-n-InAs(Sb), 3-n + -InAs, 13-screw header package, 14, 15, 16-optical glue, $h\nu_1 = h\nu_2$.

T. Kuusela et al Vibrational Spectroscopy, 51(2), 289-293 (2009).



Microimmersion lens diodes



1 mm



1 mm sapphire
ball lens

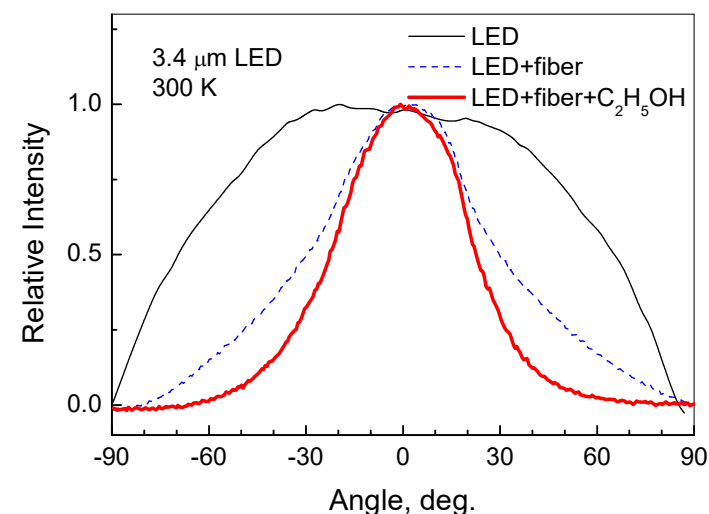
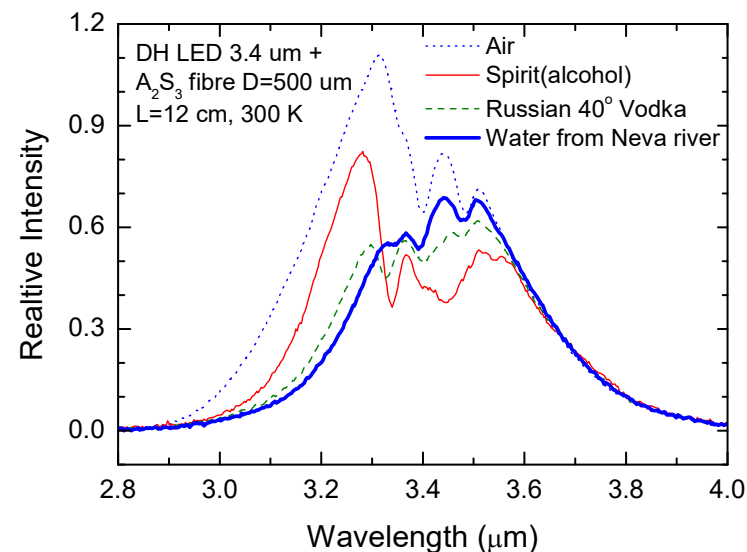
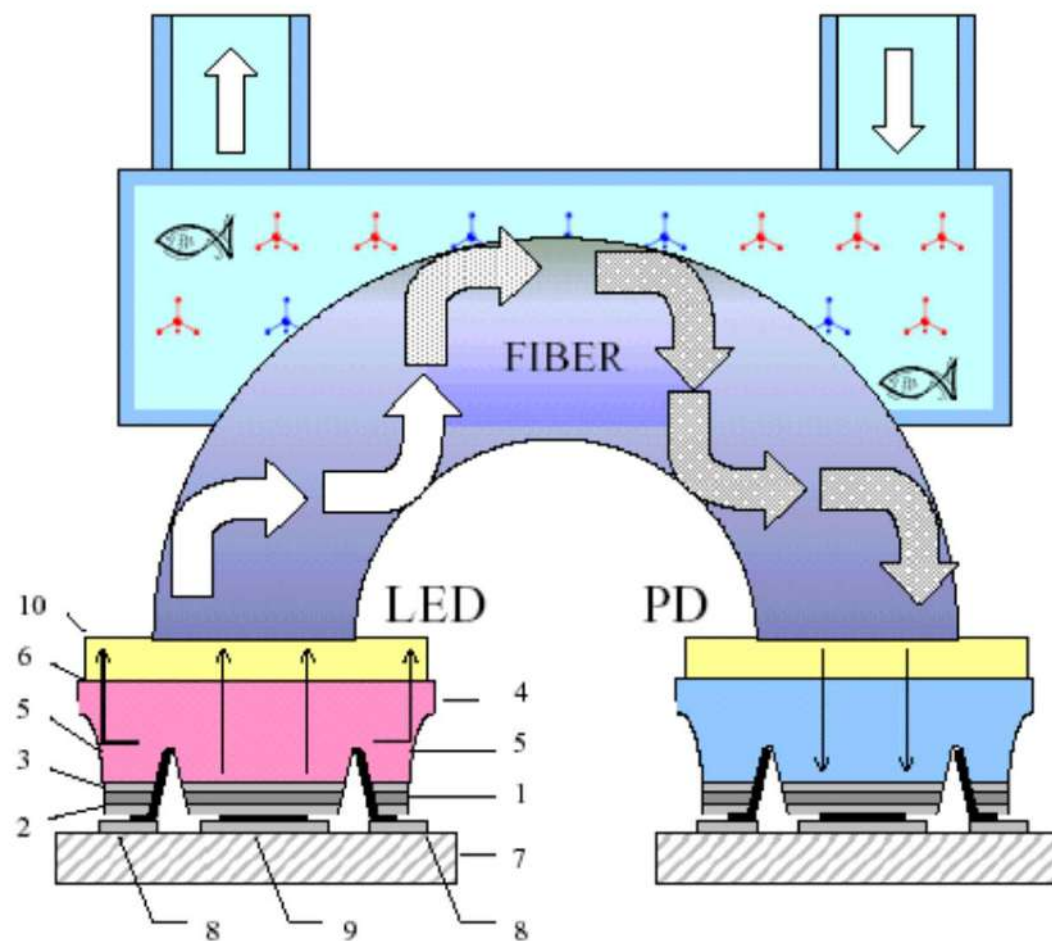


1 mm chalc.gl.
“ball” lens

Journal of Optical Technology, Vol. 79, Issue 9, pp. 571-575 (2012)

1. С чего все начиналось
2. Мечты, мечты...
3. Мечты сбываются

Сенсоры на основе поглощения «исчезающей» ВОЛНЫ



IR detector for hydrocarbons concentration measurement in emissions during petroleum and oil products storage and transportation

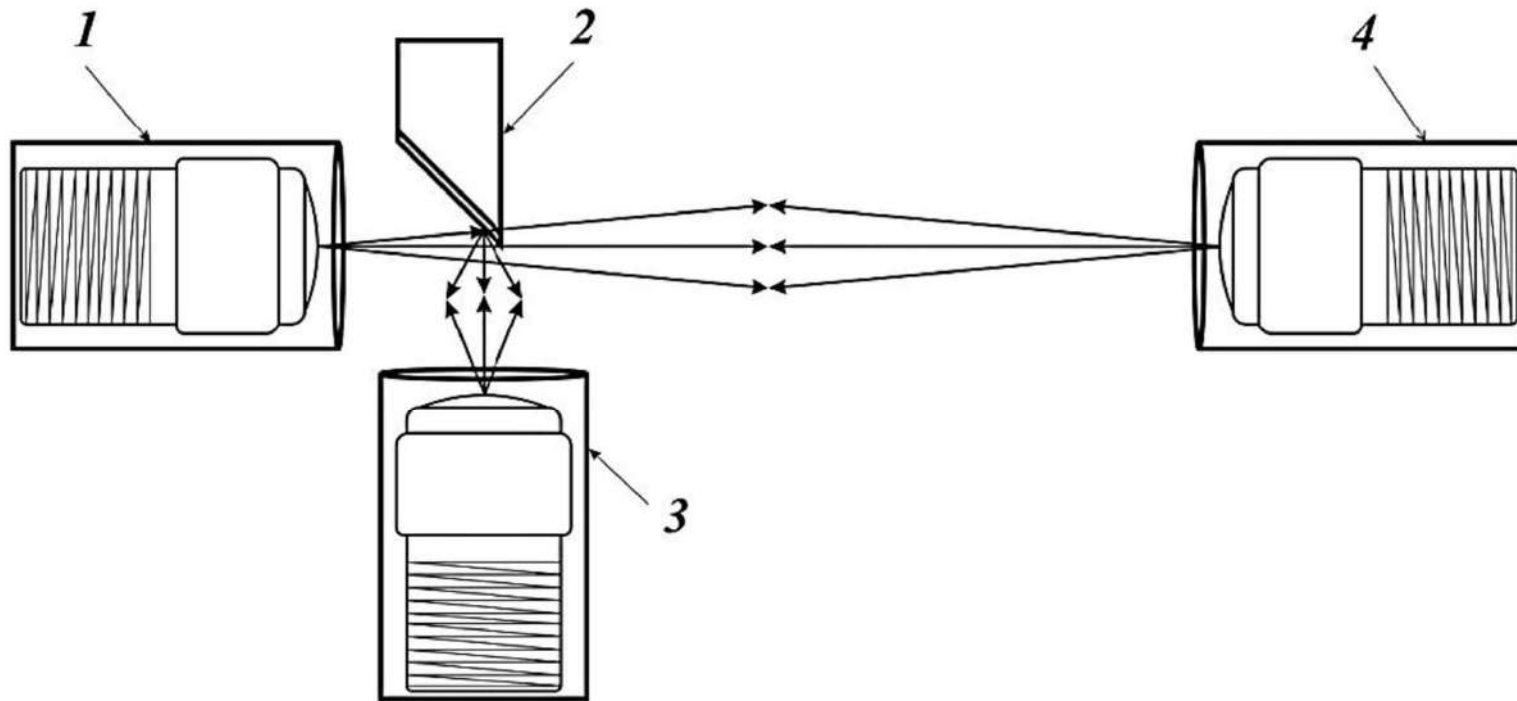
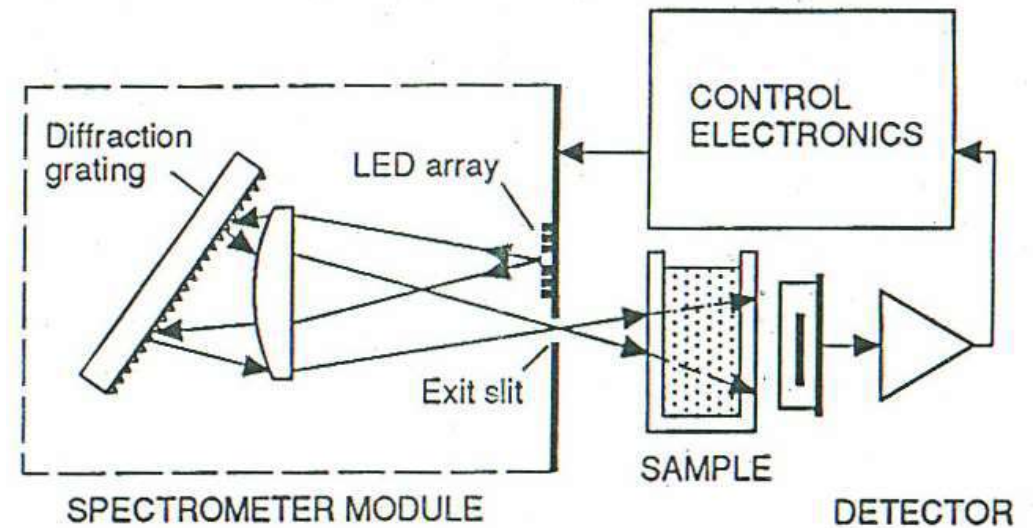
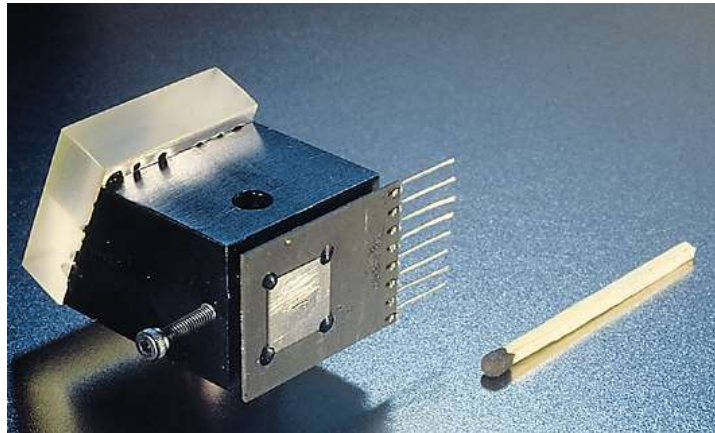


Figure 3 – Optic sheme of detector
1 – LED, 2 – deflecting mirror, 3 – PD of reference channel; 4 – PD of measuring channel

Proc. of SPIE Vol. 8155, 81550T · (2011)

Wavelength selection by grating in LED array spectrometer ($\Delta\lambda=60$ nm, $\lambda=3.3$ μm)

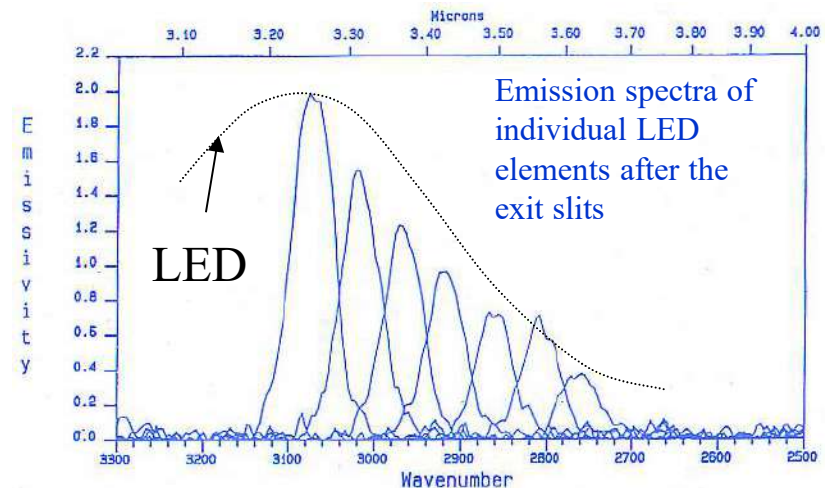


0.4×0.4 mm², $I=2$ A

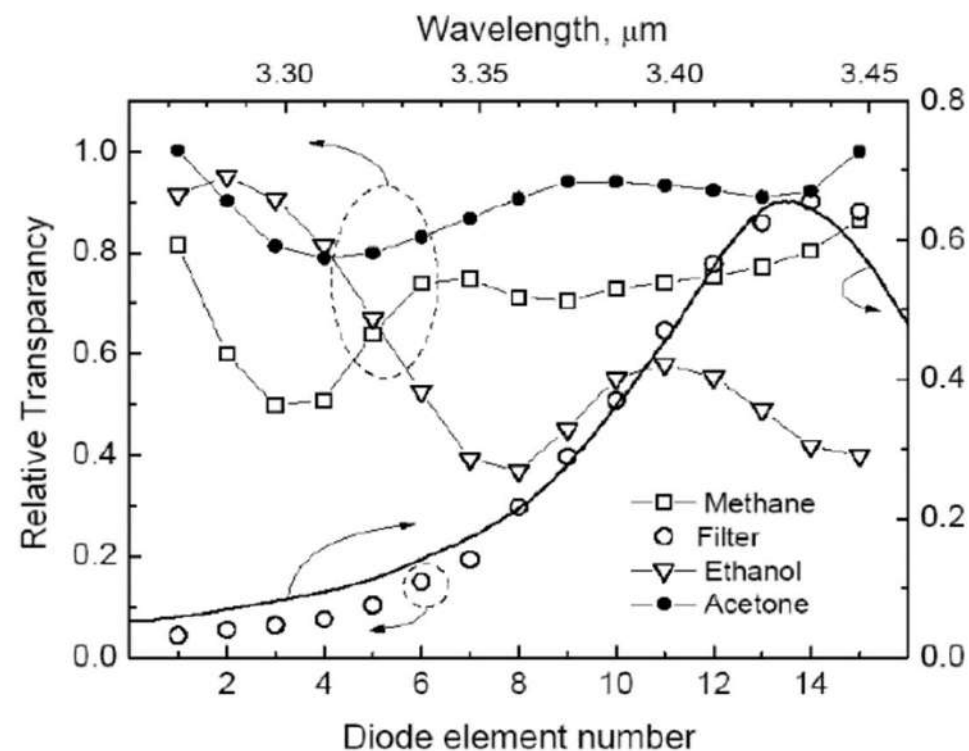
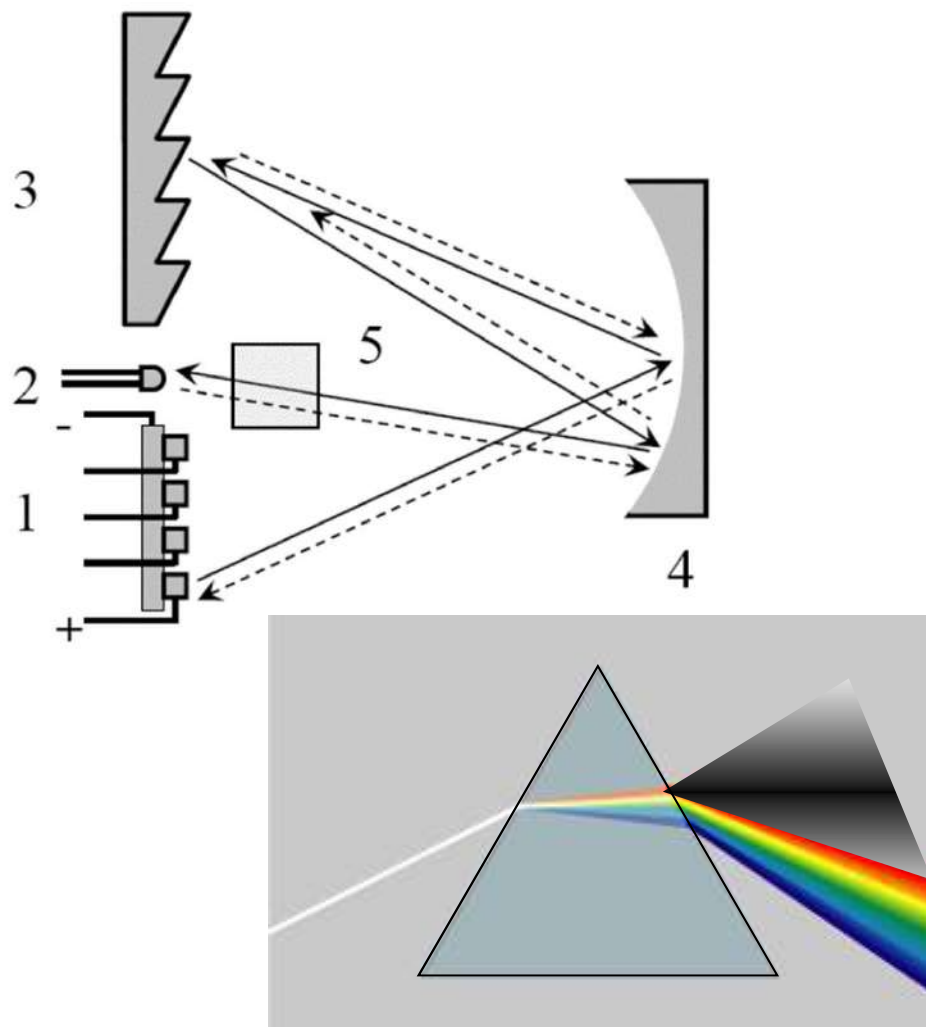
FWHM=60 nm

$P=100$ -440 nW

Ref. SPIE vol.2069, pp.95-101



LED array spectrophotometer $\lambda=3.3 \mu\text{m}$)



Сб. н. статей 7-ой Межд. научной конф. по военно-техническим проблемам обороны и безопасности, использованию технологий двойного применения, Минск, 20-22 мая 2017 года, Часть 3, стр. 37-43

Применения ИК линеек/матриц

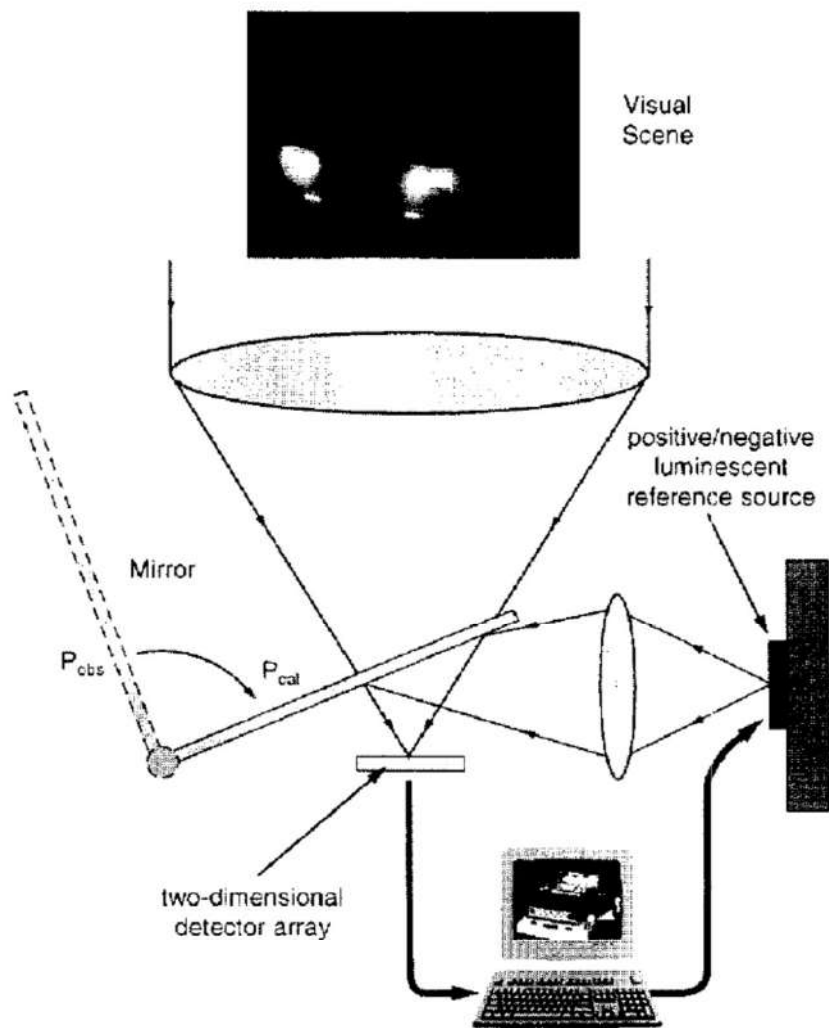


Fig. 6. Schematic of a staring array imager used with the mirror in the position P_{obs} for viewing the scene and in the position P_{cal} for viewing the luminescent reference diode.

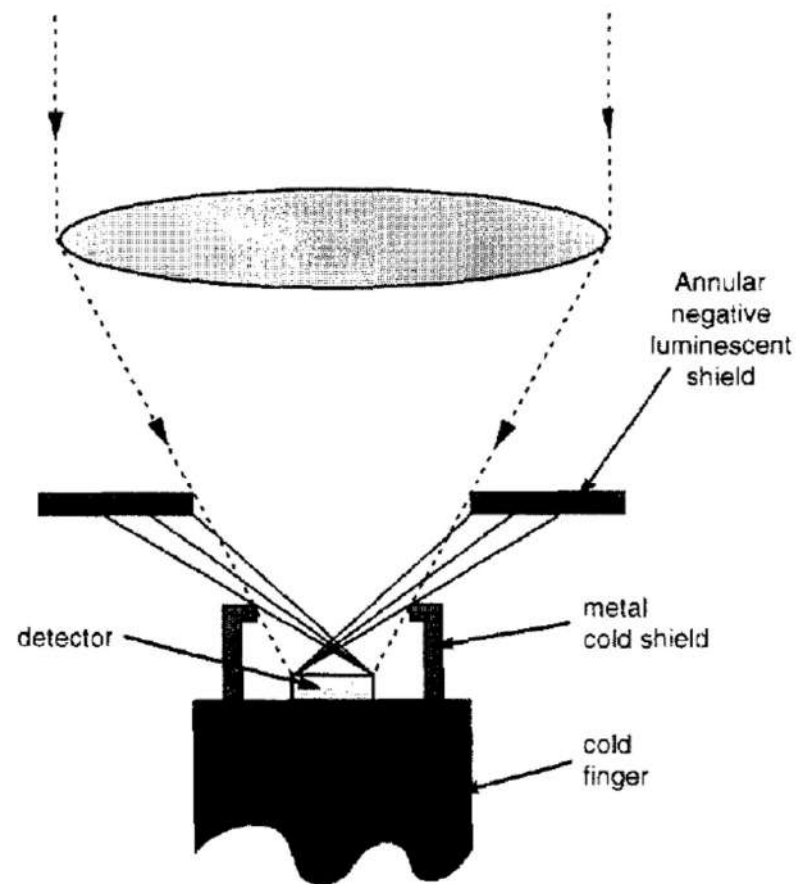
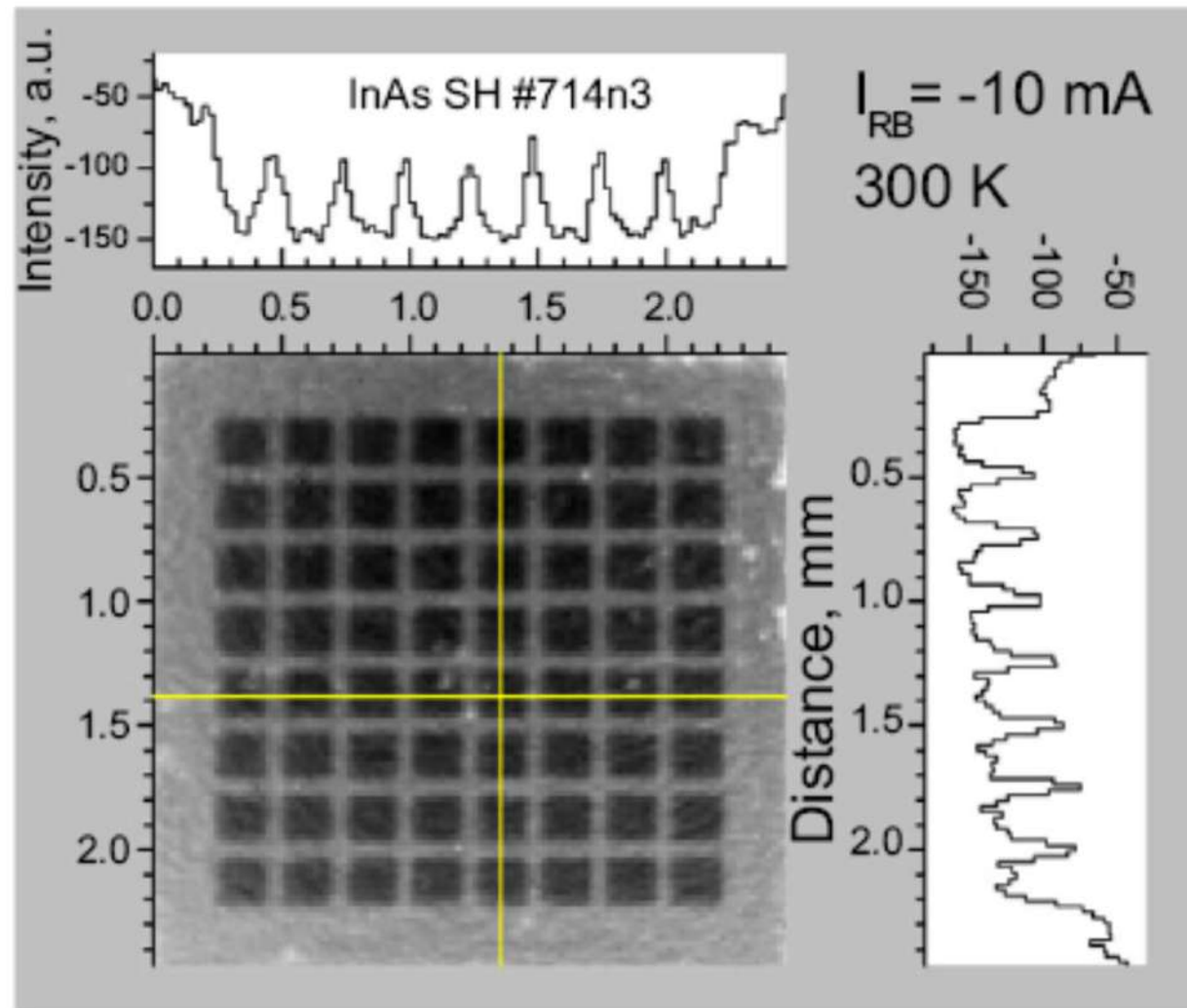


Fig. 3. Schematic illustration of the use of a negative luminescent device to improve the cold-shield efficiency of an IR detector array.

Infrared Physics & Technology 38 (1997) 145–151

Матричные ФД на основе InAs/InAsSbP, разработанные в ФТИ



(c)

Применения ИК линеек/матриц

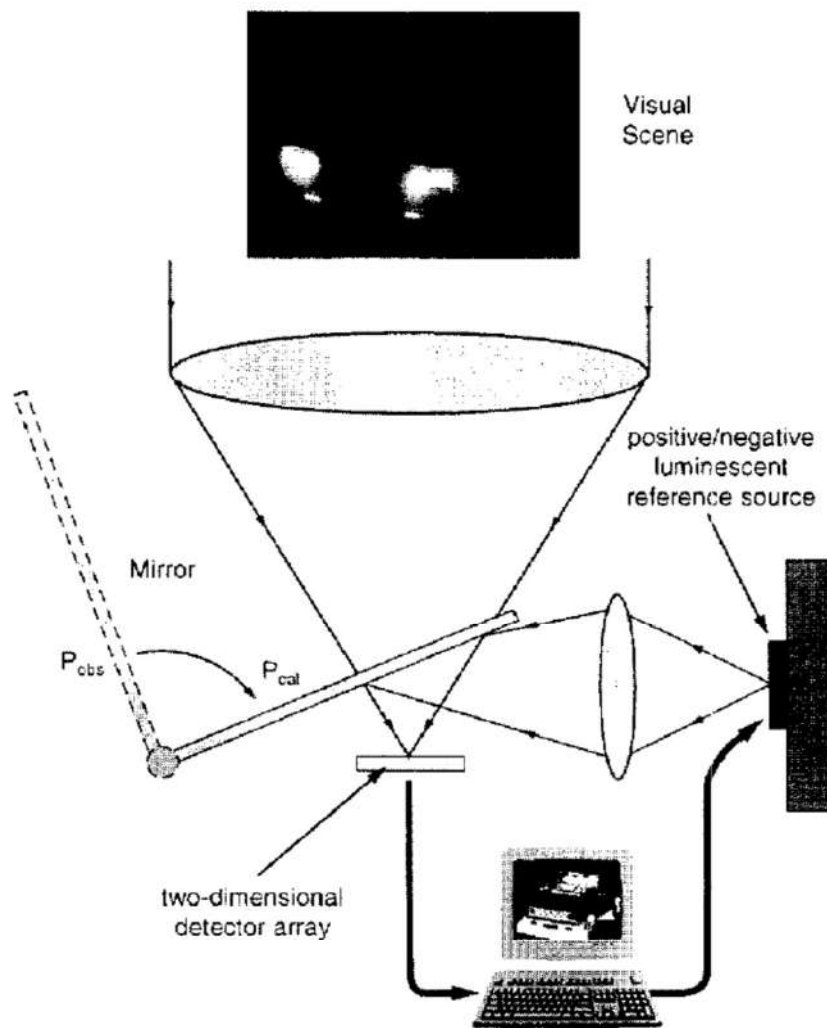


Fig. 6. Schematic of a staring array imager used with the mirror in the position P_{obs} for viewing the scene and in the position P_{cal} for viewing the luminescent reference diode.

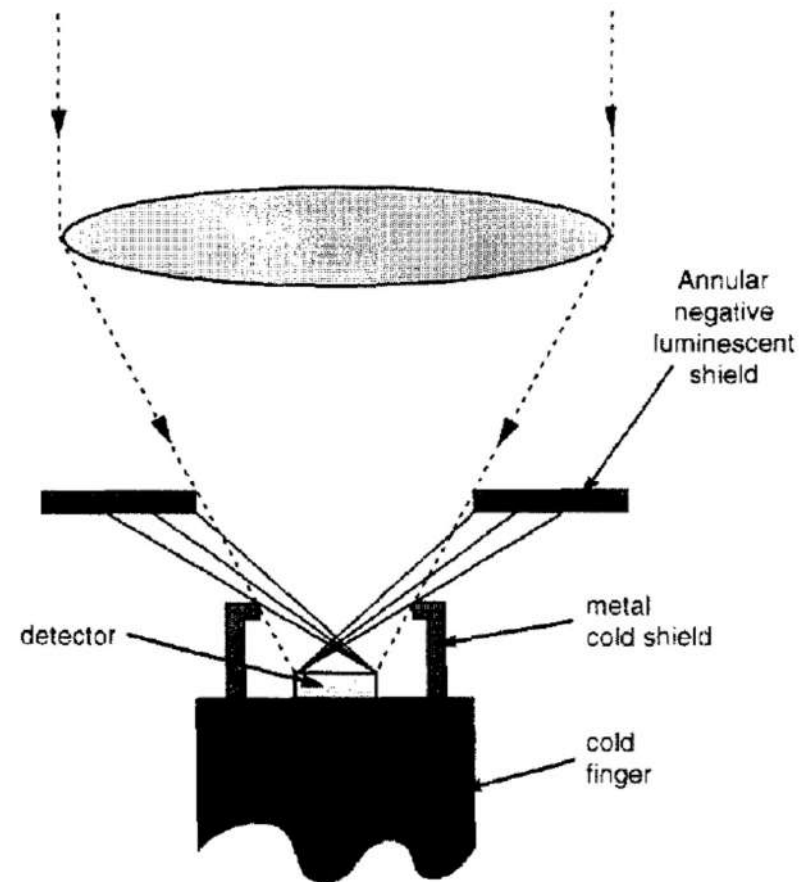
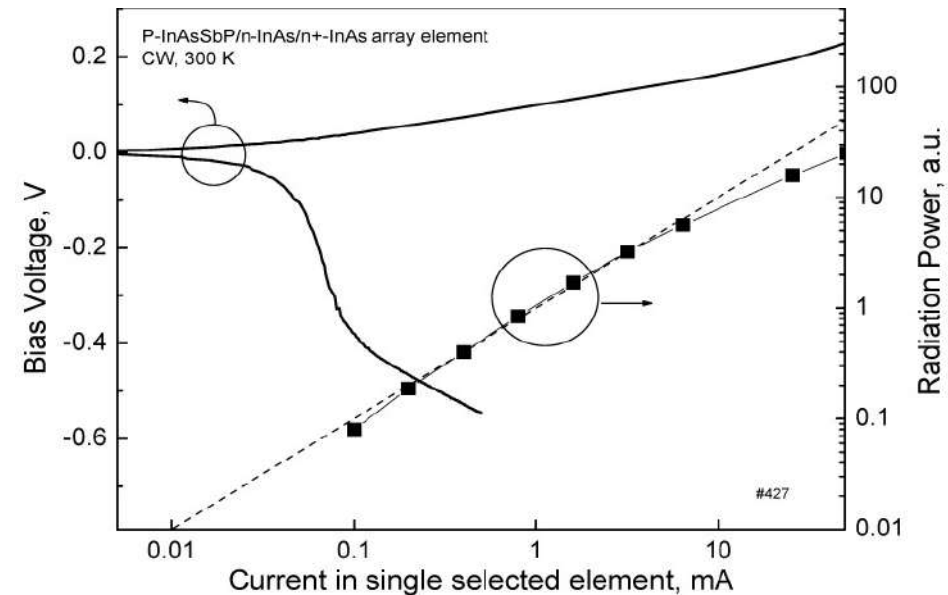
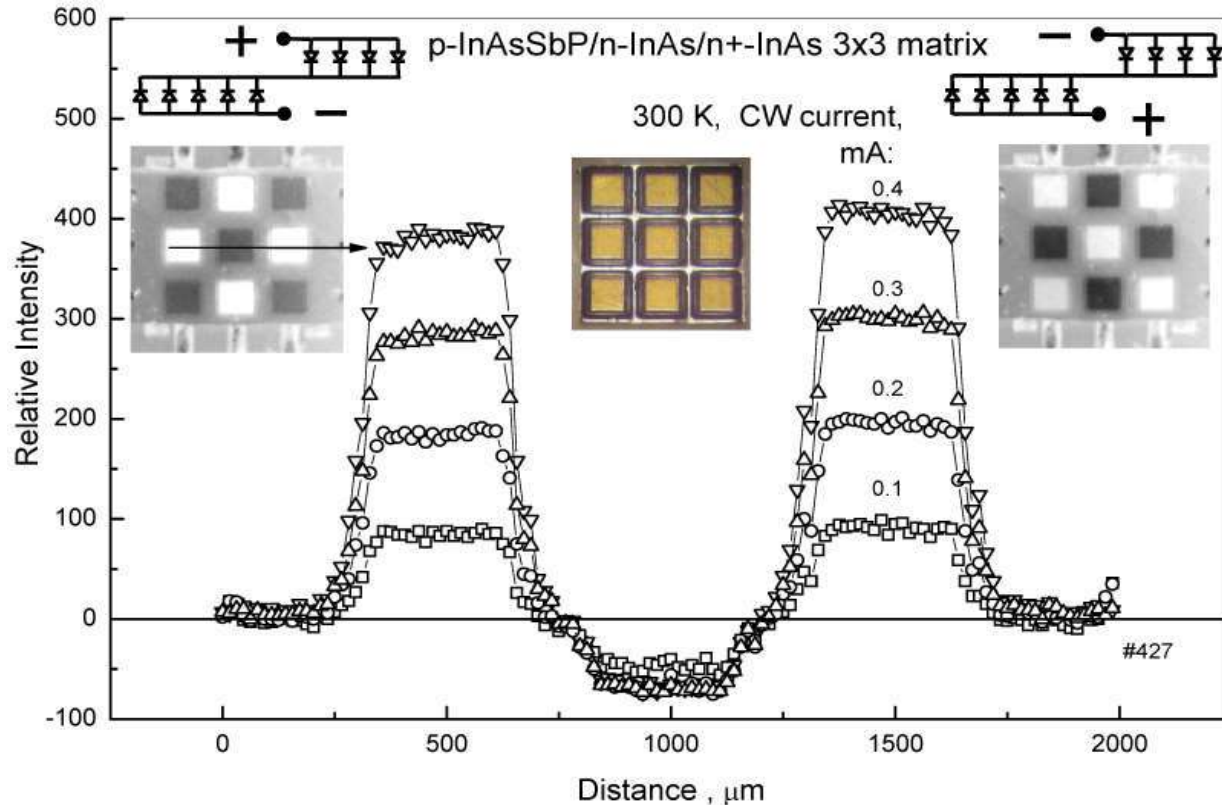


Fig. 3. Schematic illustration of the use of a negative luminescent device to improve the cold-shield efficiency of an IR detector array.

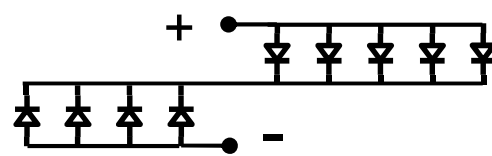
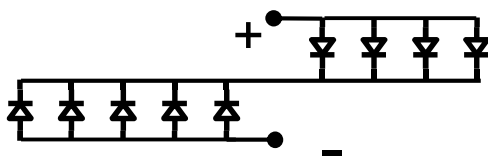
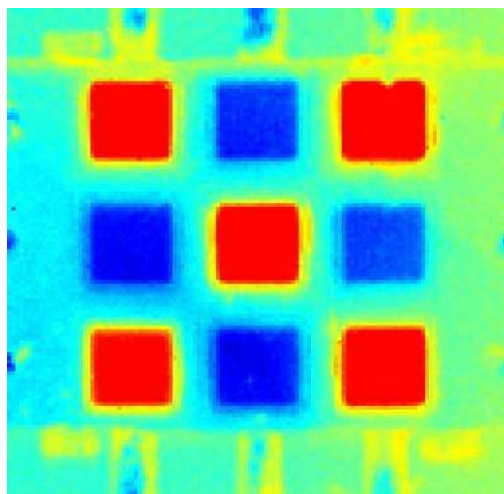
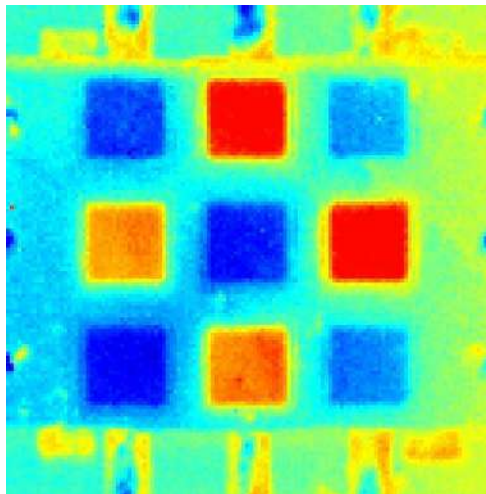
Infrared Physics & Technology 38 (1997) 145–151

3x3 LED/PD p-InAsSbP/n-InAs array



Il'inskaya et al [Applied Physics, issue 6, Pages 47-51 \(2014\)](#)

Tic Tac Toe photonics



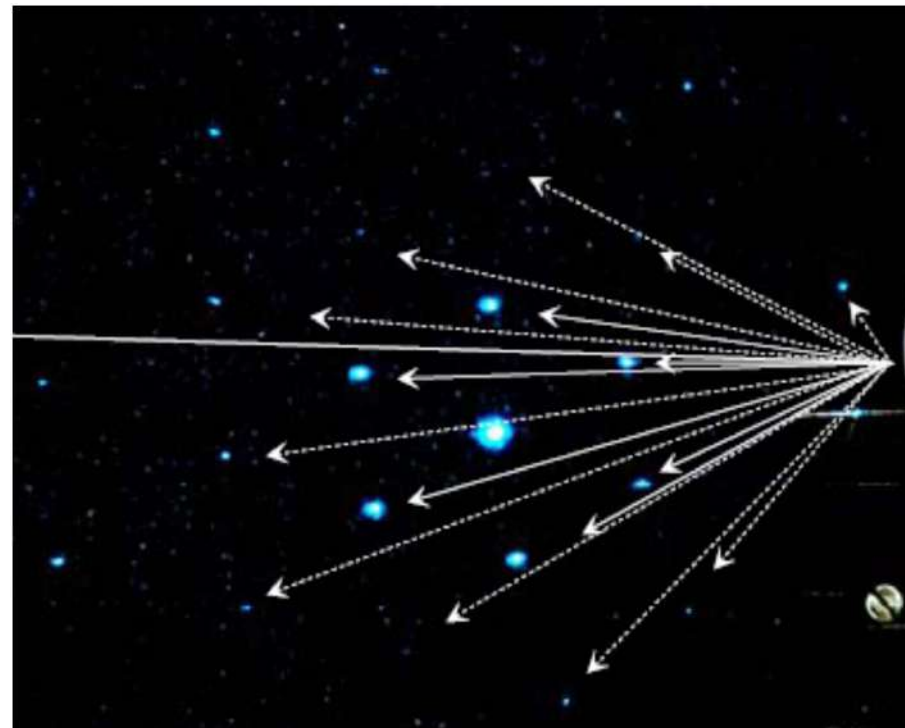
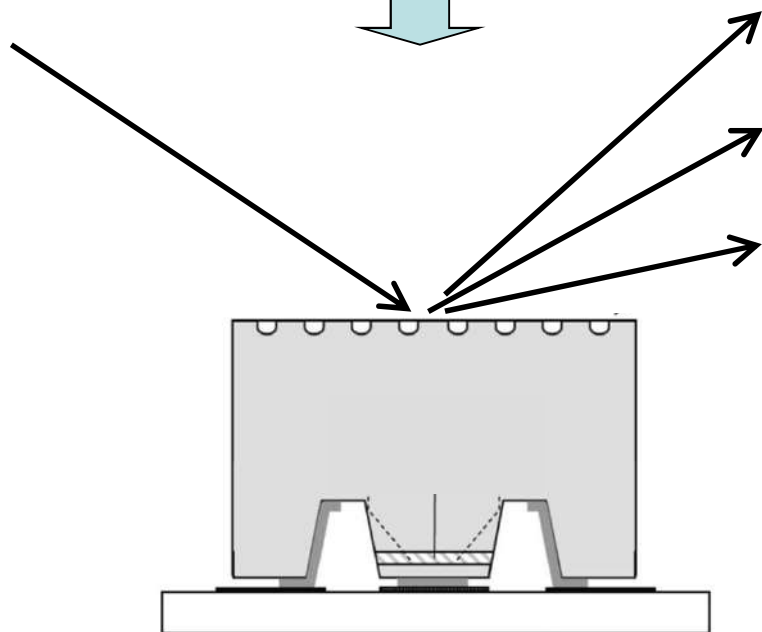
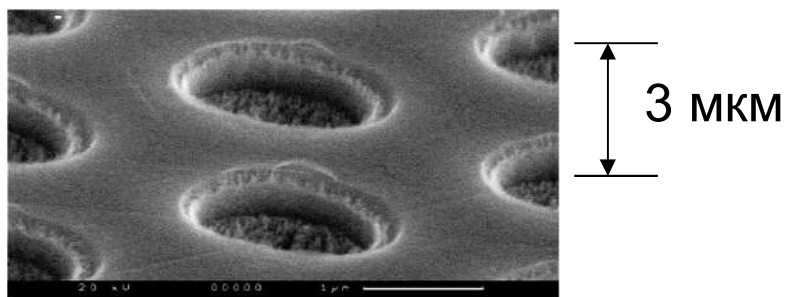
$\lambda=3.4 \mu\text{m}$ Positive luminescence

$\lambda=3.4 \mu\text{m}$ Negative luminescence

- Individual addressing of InAs LED/PD elements
- Linear or matrix (e.g. 3x3) configuration
- Fast response and long-term stability
- Narrow bandwidth

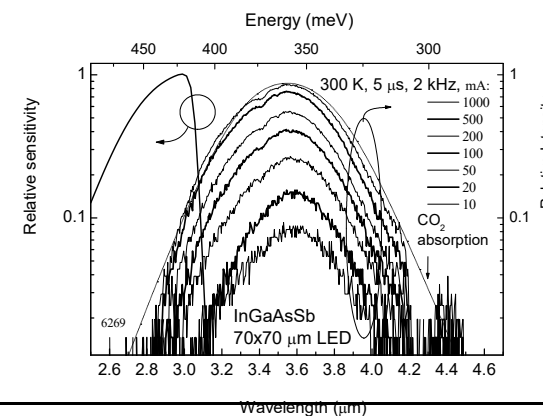
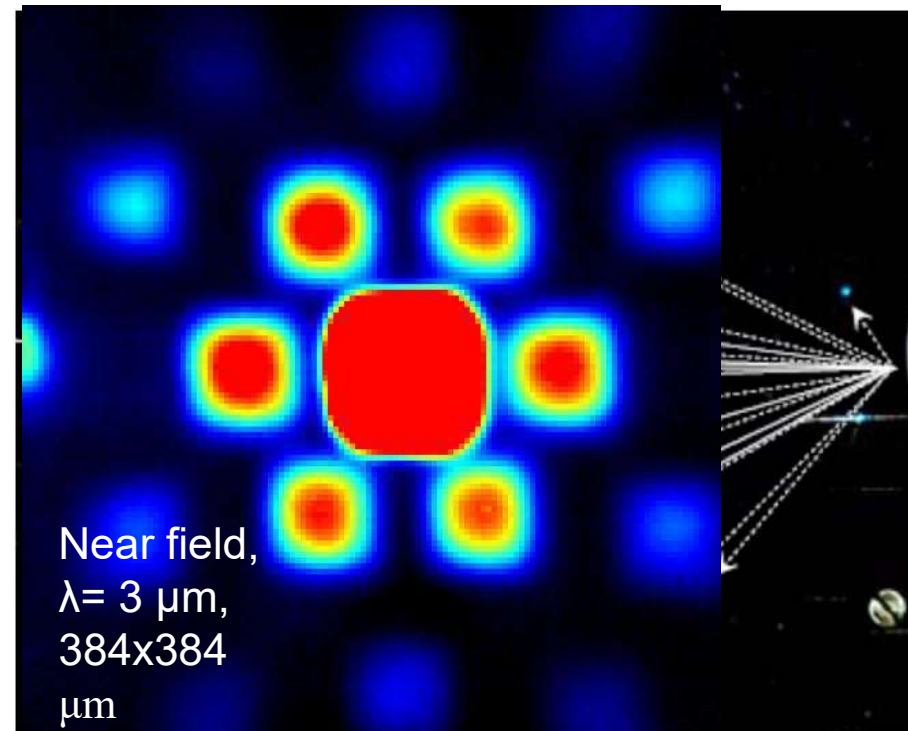
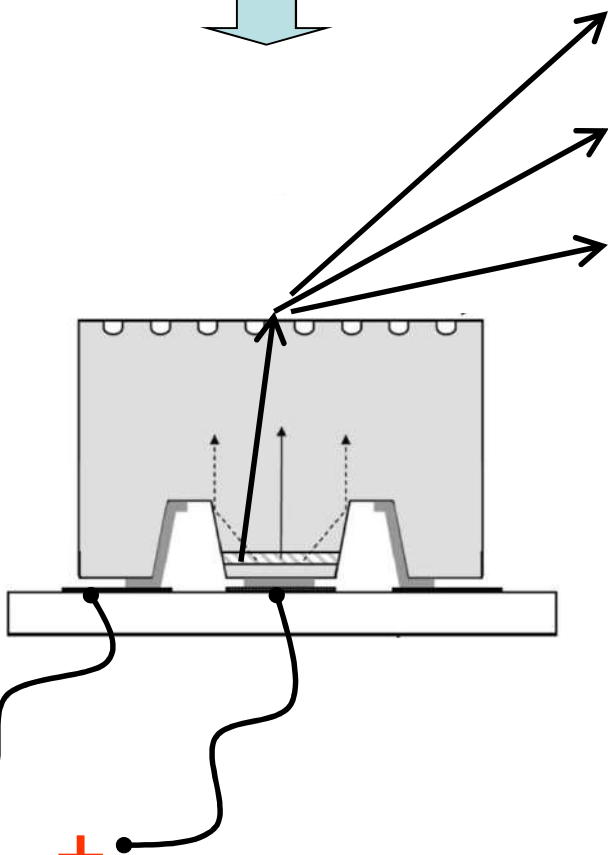
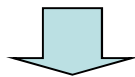
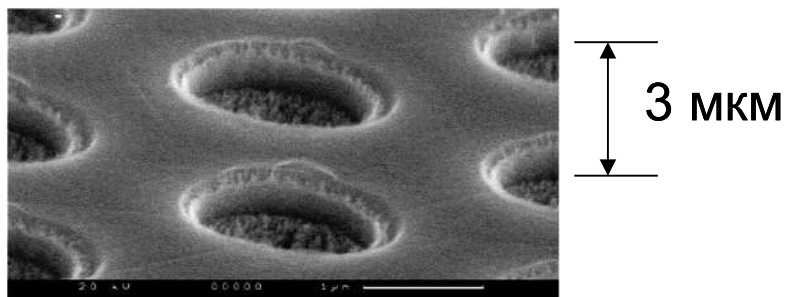
Il'inskaya et al [Applied Physics, issue 6, Pages 47-51](#) (2014)

Фотонные кристаллы

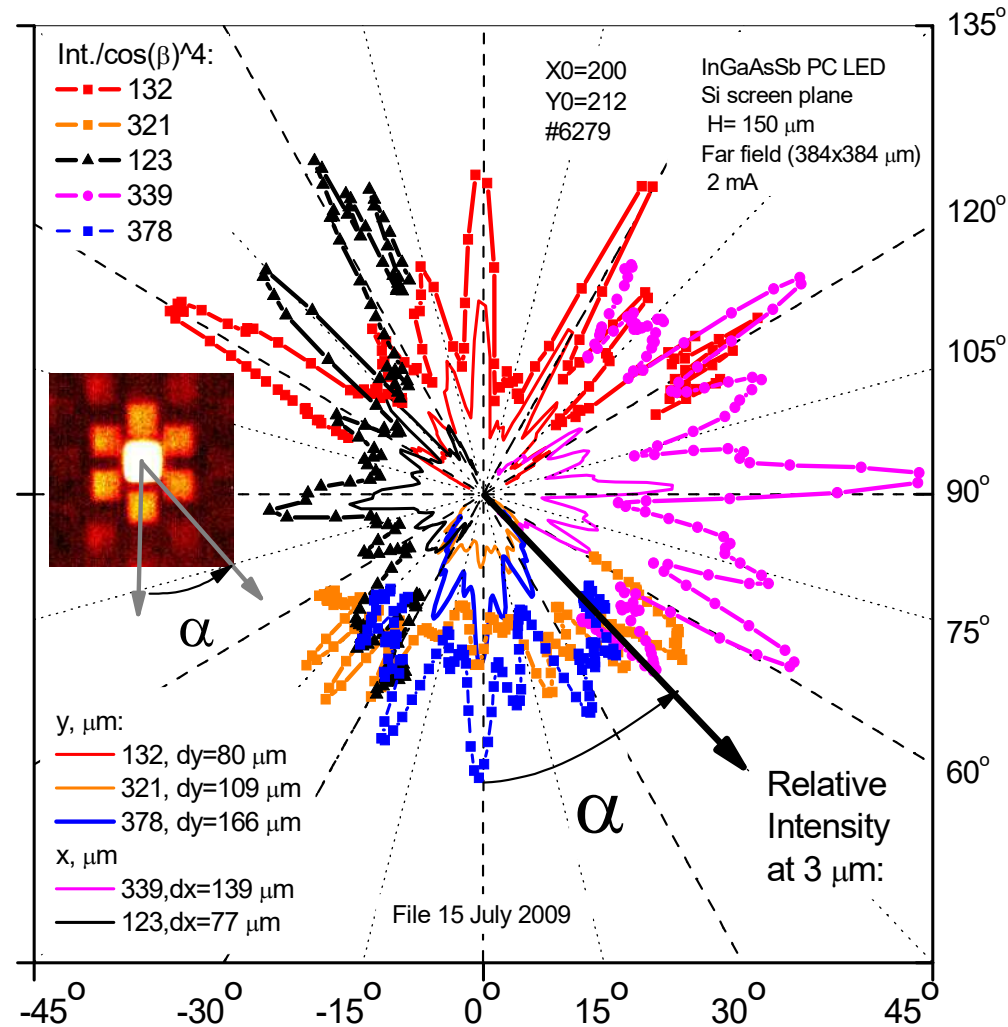


Diffraction of blue laser beam at the PC LED surface

Фотонные кристаллы

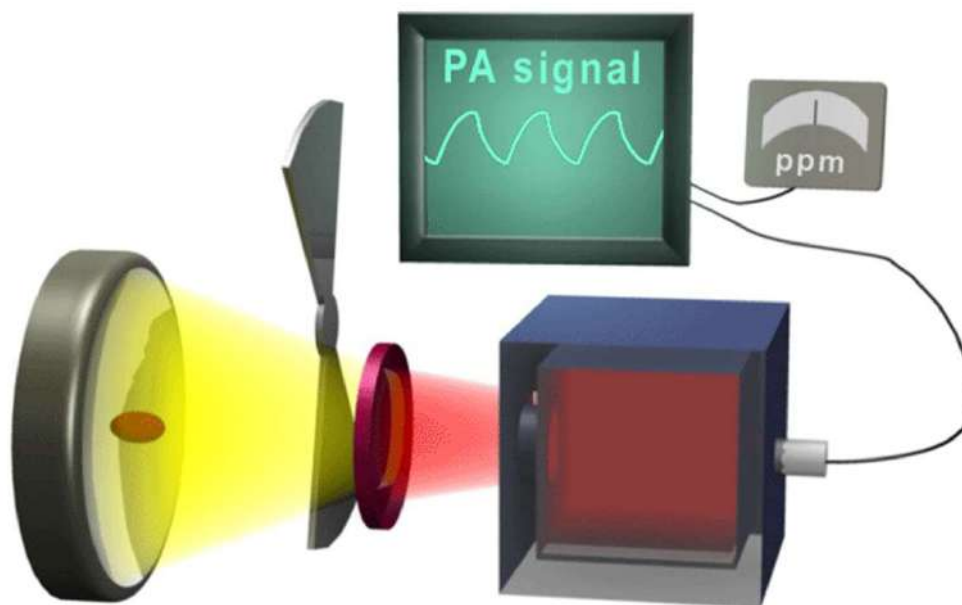
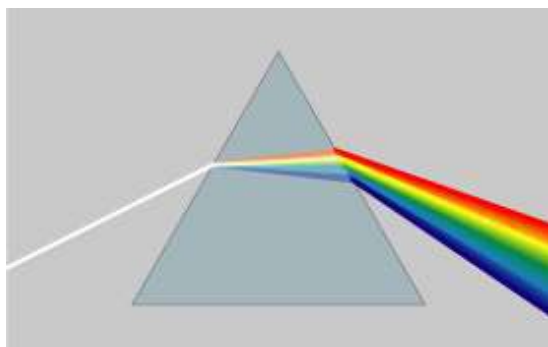


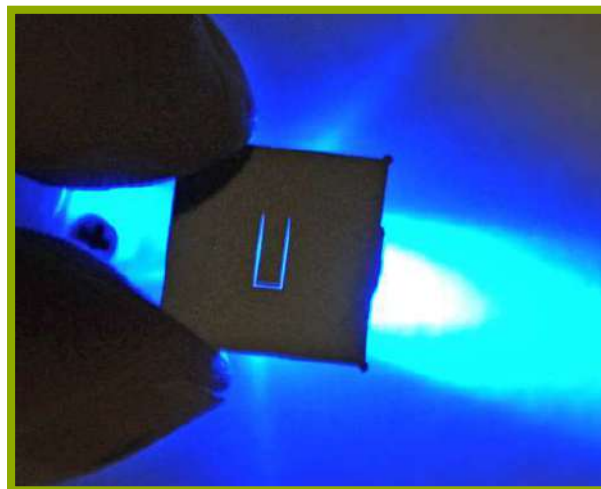
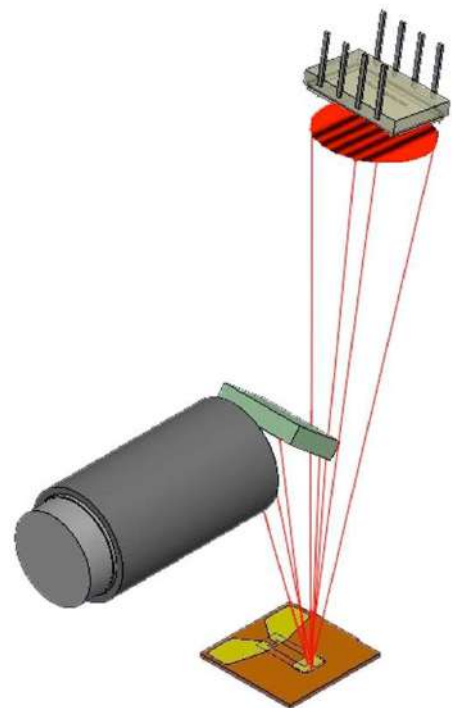
Распределение излучения в дальнем поле СД с фотонным кристаллом



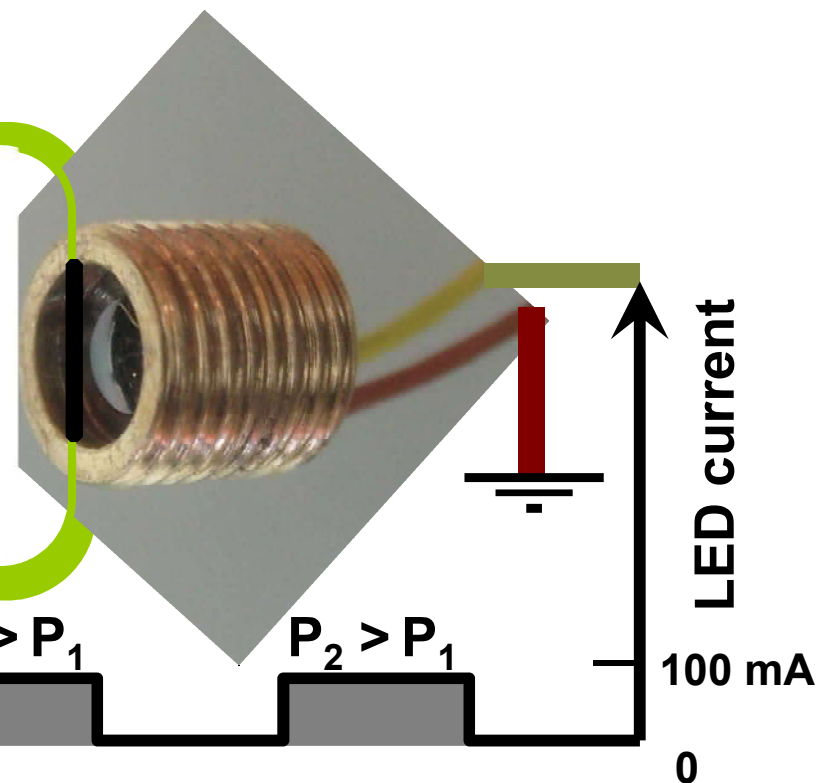
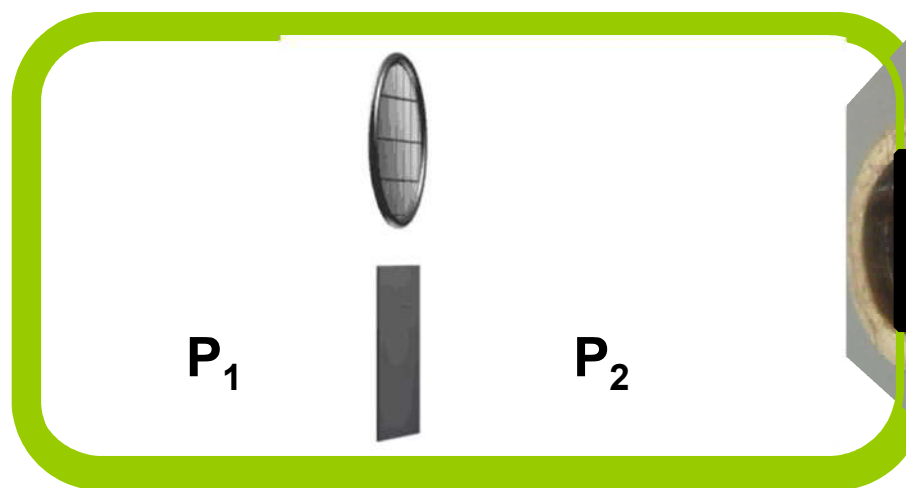
LED under forward bias

Gas absorption measurements (C_nH_m , CO_2 , trace, open path, gas cell) with LED-PD pairs and photoacoustic detector.





- Cantilever sensor (microphone) is coupled with interferometric measurement of the displacement
- Below picometer (10^{-12} m) displacement can be detected with the optical readout

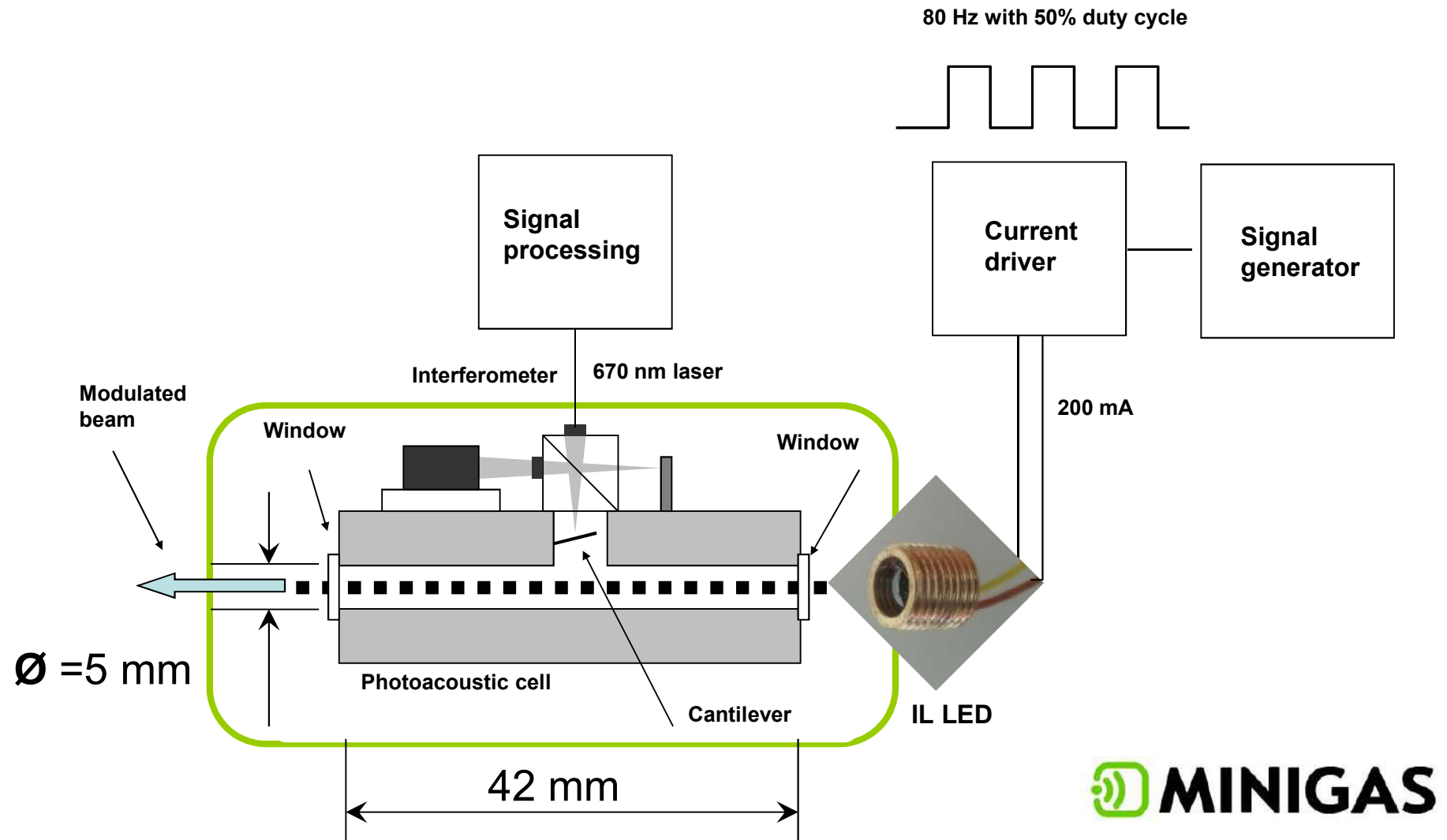


GASERA

UTU.fi
TURUN YLIOPISTO
UNIVERSITY OF TURKU

Gas absorption measurements (CnHm, CO2, trace, open path, gas cell) with LED-PD pairs and photoacoustic detector.

Photoacoustic measurements with IL LEDs.

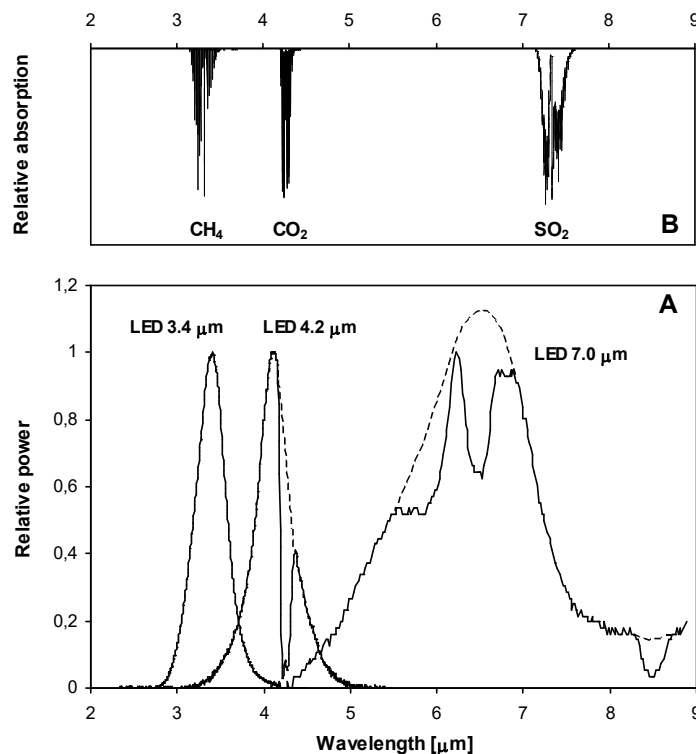


T. Kuusela et al Vibrational Spectroscopy, 51(2), 289-293 (2009).

 **MINIGAS**

Gas absorption measurements (CnHm, CO₂, trace, open path, gas cell) with LED-PD pairs and photoacoustic detector.

Photoacoustic measurements with IL LEDs.



Gas	Detection limit at 1 s integration (ppm)	LED active area	λ (μm)
CH ₄	26	InAs	3.1 – 3.5
CO ₂	11	InAsSb	4.2 – 4.4
C ₃ H ₈	6	InAs	3.1 – 3.5
C ₃ H ₈	330	InSb	6.5 – 7.5
SO ₂	620	InSb	7.1 – 7.6

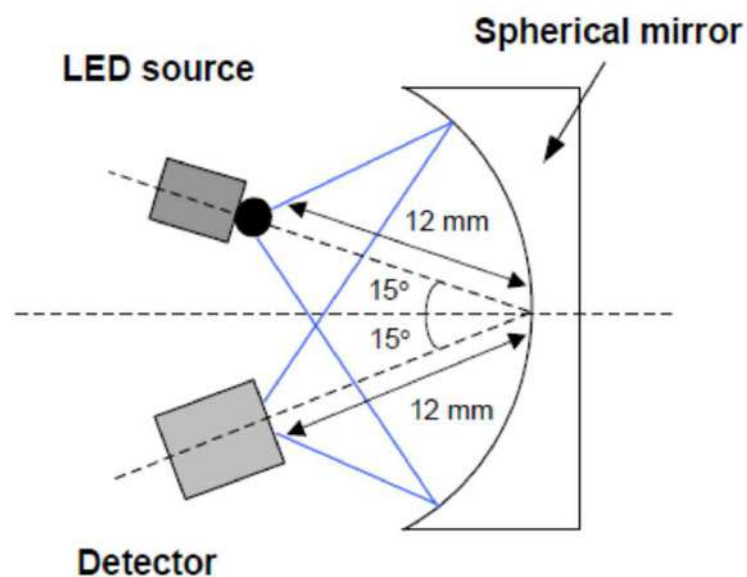
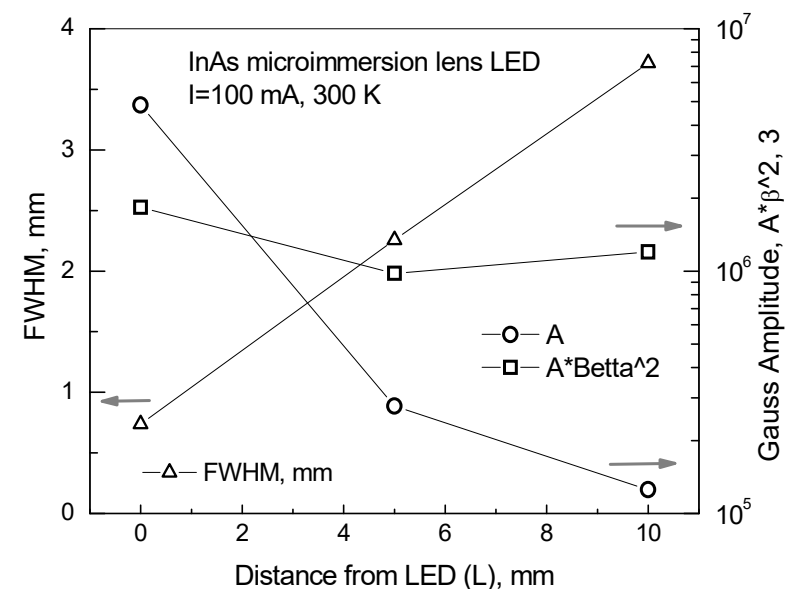


T. Kuusela et al Vibrational Spectroscopy, 51(2), 289-293 (2009).



MINIGAS

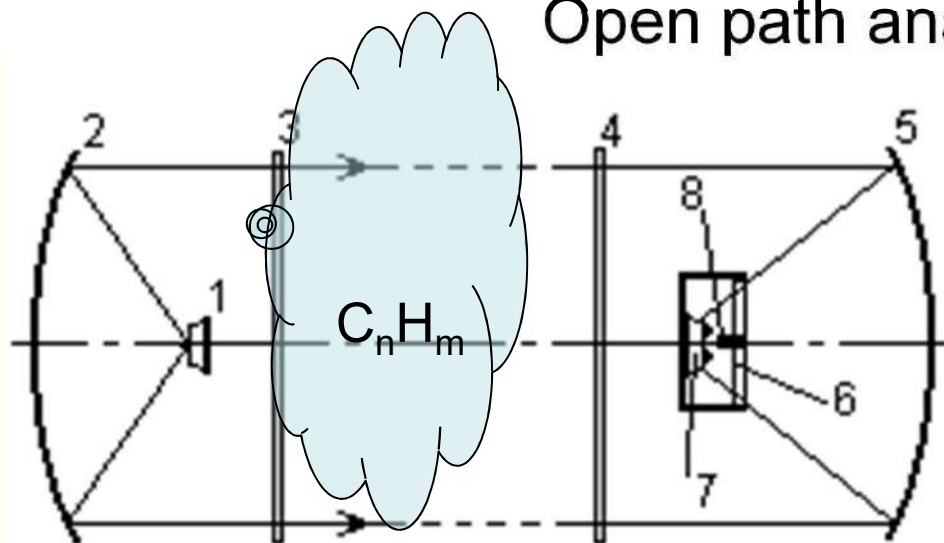
Microimmersion lens LEDs from $\text{p-InAsSbP/InAs/n}^+\text{-InAs}$ ($\lambda = 3.4 \mu\text{m}$)



**$P=120 \mu\text{W}$ at $I=100 \text{ mA}$
74% collection efficiency at a
distance of 12 mm from gold plated
mirror $R= 12.0 \text{ mm}$
($f = 6.0 \text{ mm}$), $\varnothing= 12.0 \text{ mm}$.
Image size $\sim 1 \text{ mm}$**

1. С чего все начиналось
2. Мечты, мечты...
3. Мечты сбываются!!!

Open path analyzer of hydrocarbons



Кузнецов А.А., Балашов О.Б., Васильев Е.В., Логинов С.А., Луговской А.И., Черняк Е.Я., «Дистанционный инфракрасный детектор углеводородных газов», Приборы и системы. Управление контроль, диагностика, № 6, 55-59 (2003).



Gas absorption measurements (C_nH_m , CO_2 , trace, open path, gas cell) with LED-PD pairs and photoacoustic detector.

Open path C_nH_m analyzer for petroleum plants based on microimmersion InAs PDs

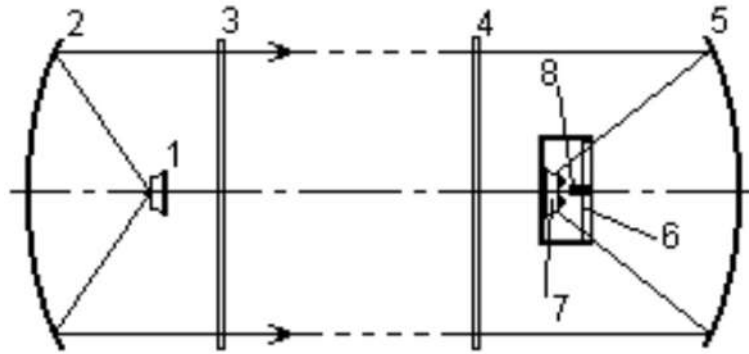


Fig.1. The optical scheme of a trace gas analyzer:
1 - IR LED; 2,5 - spherical mirrors; 3,4 - protective light filters; 6 - composite interference filter; 7 - IR photodetector; 8 - shield.

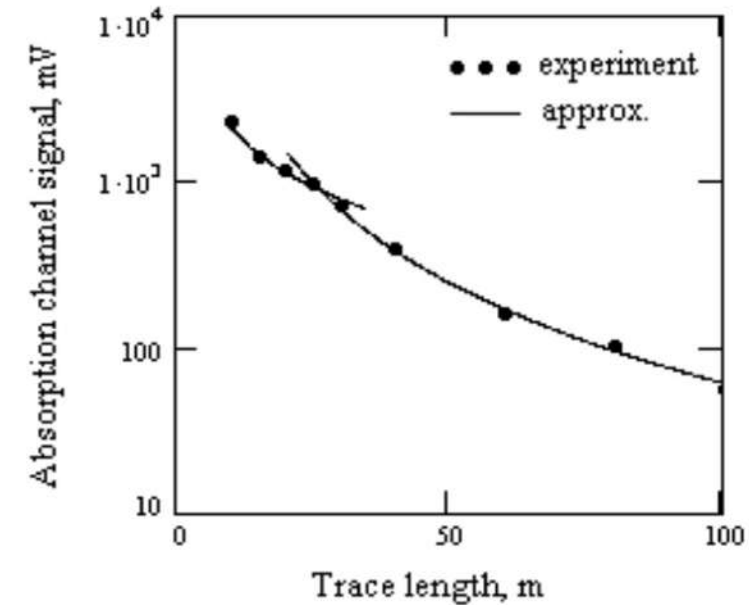
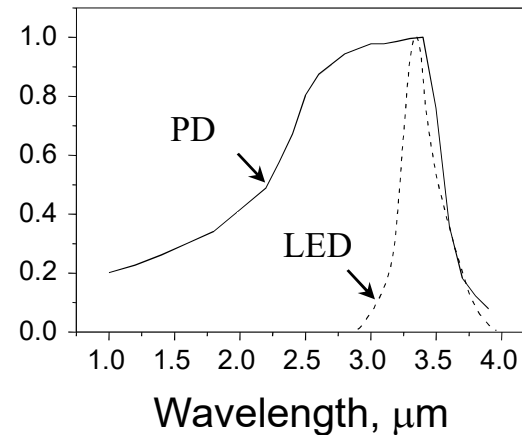
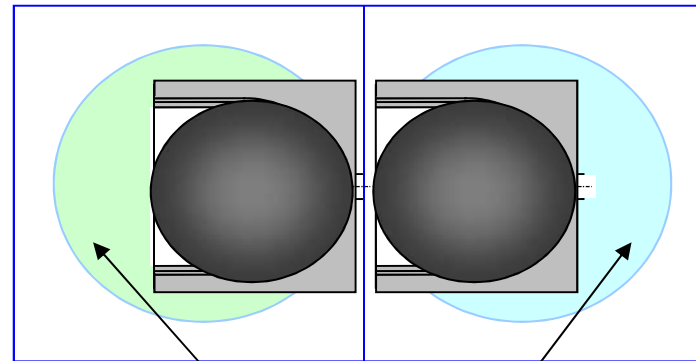


Fig.2. Absorption channel signal vs trace length.



Filters : $\lambda=3.3 \mu m$, $\lambda=3.6 \mu m$

ШИББОДЕТ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА

Системы контроля толщины при производстве полиэтиленовых пленок

Материал – ПВХ, LDPE, HDPE, PP,
LLDPE

Диапазон измерения толщины
4 – 700* мкм

*- пленка без сажи.

Разрешающая способность

При толщине 4 – ~50 мкм 0.01 мкм

При толщине 50 – ~350 мкм 0.1 мкм

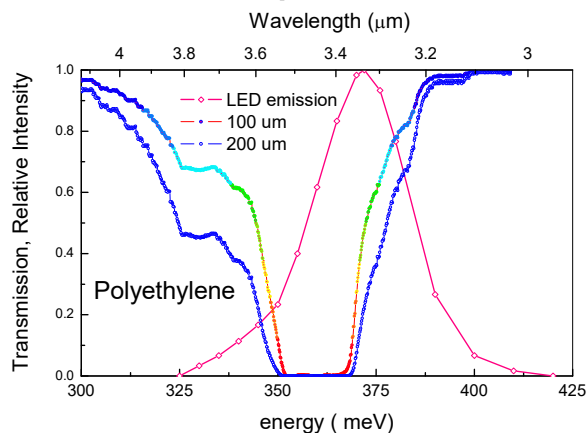
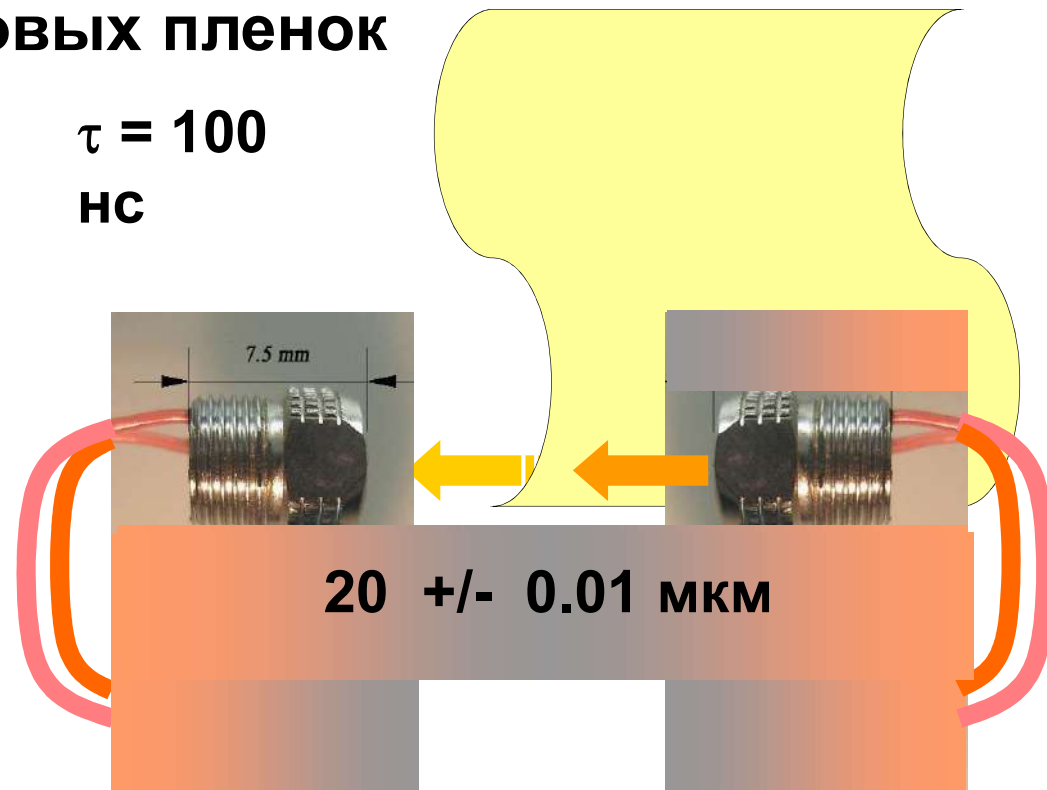
При толщине 350 и более мкм 1 мкм

Точность измерений

Зависит от точности корректировки

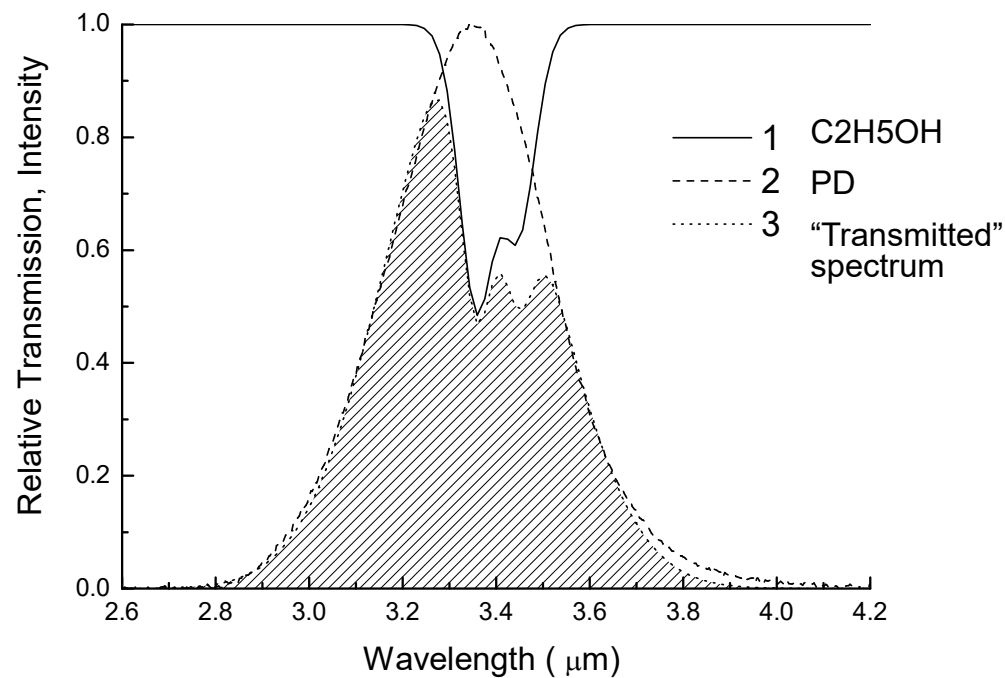
Находится в пределах 0,3 - 5%

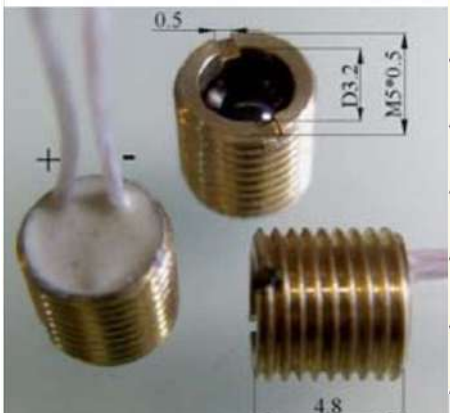
$\tau = 100$
нс



Alcotester

Спектрофотометрический анализатор
концентрации паров этанола
в выдыхаемом воздухе **АКПЗ-01 МЕТА**



PD34Sr	λ	μm	3.35 ± 0.05
	λ_{co}	μm	3.7
	$D^*_{\lambda_{\text{max}}}$	$\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$	$\geq 5 \times 10^{10}$
	S_I	A/W	≥ 1.0
	S_U	V/W	≥ 500
	R_0	Ohm	$\geq 0.5\text{k}$
	τ	ns	≤ 20

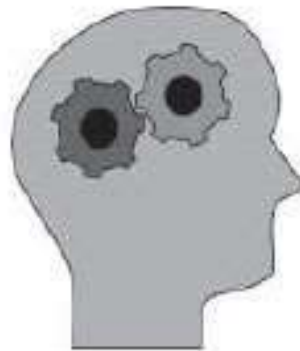


4.2 μm LED-PD sensor for capnography (CO_2 breath measurements)

Physiology

CO_2 levels provide information on the following bodily functions

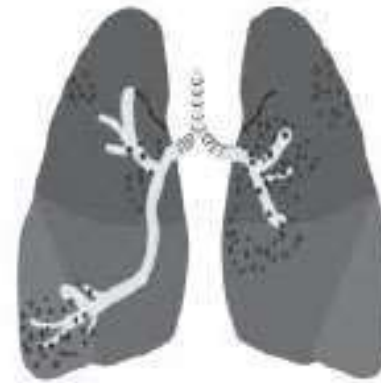
METABOLISM



PERFUSION



VENTILATION



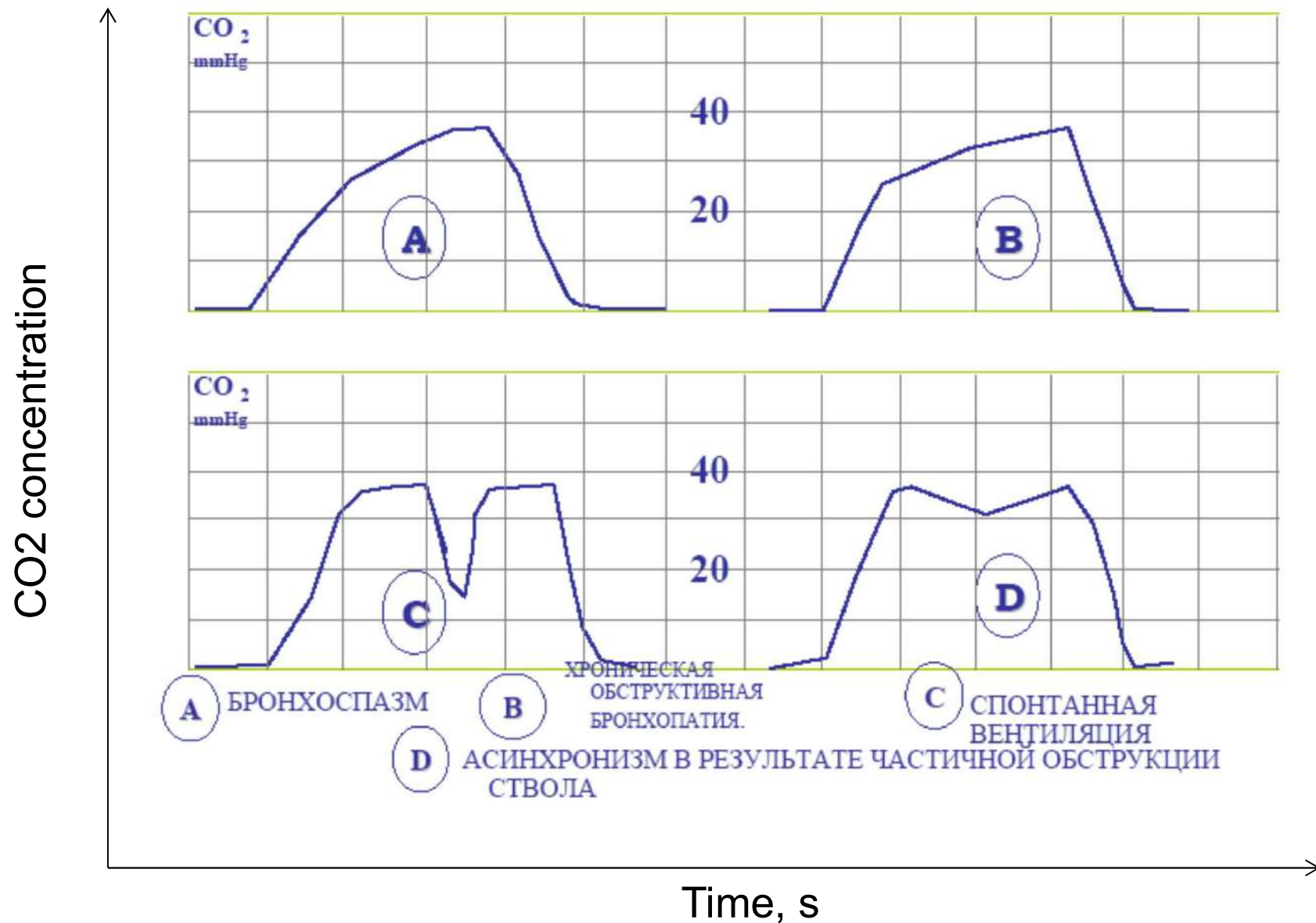
Triton Electronic Systems Ltd.

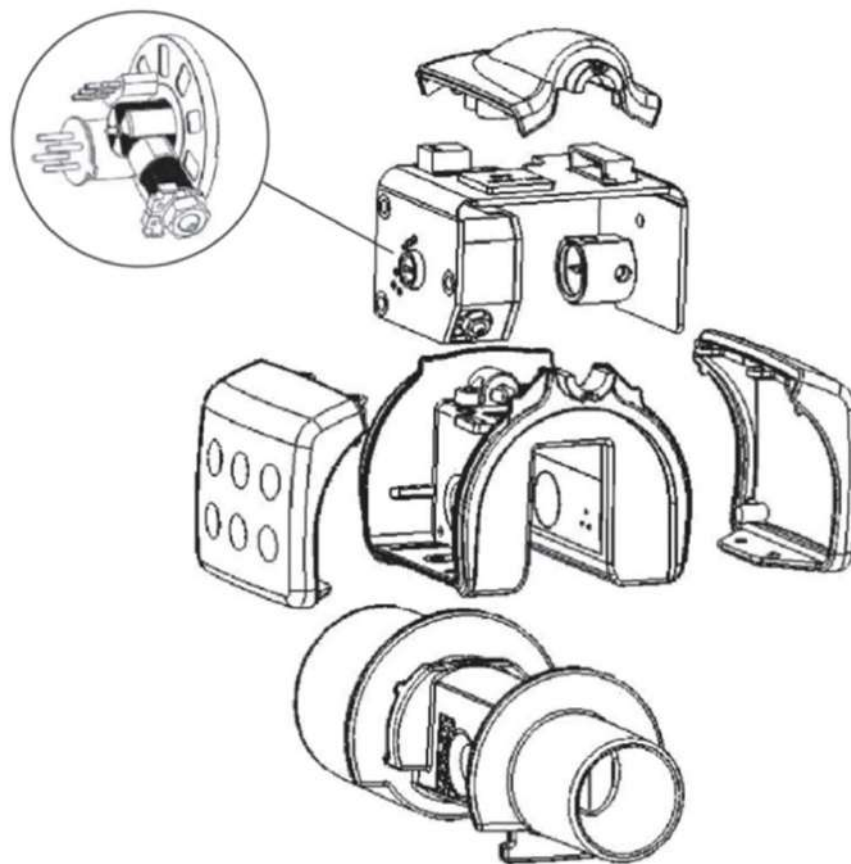
Russia, 620063, Ekaterinburg, P/O box 522

Phone: , +7 343 261 58 63

<http://www.triton.ru/>

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ МОДИФИКАЦИИ КАПНОГРАММЫ

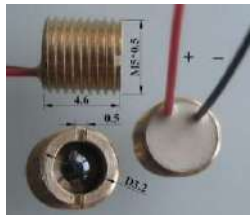




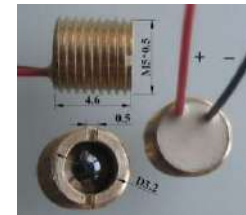
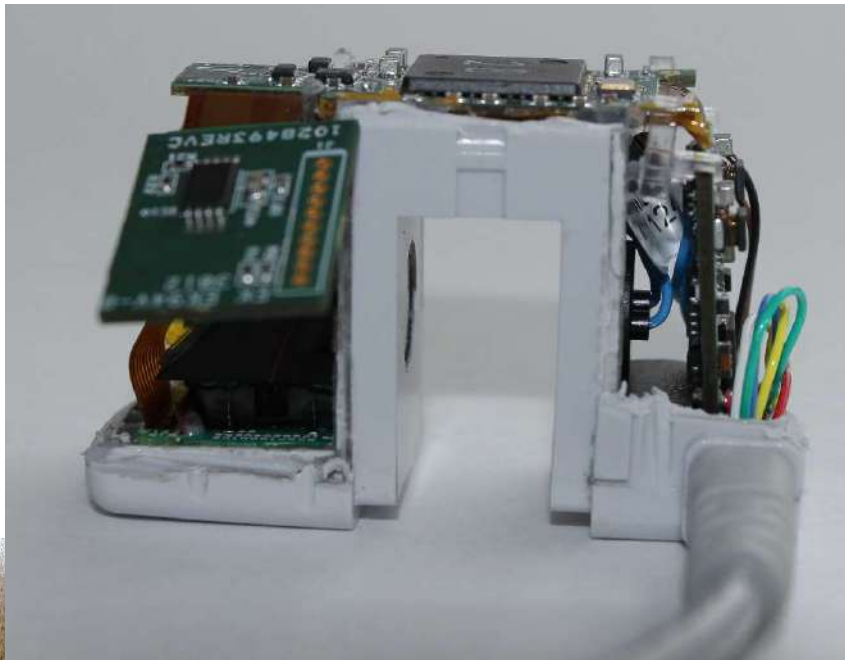
Mainstream Gas Analyzers



ООО "Тритон ЭлектроникС"



LED42Sr



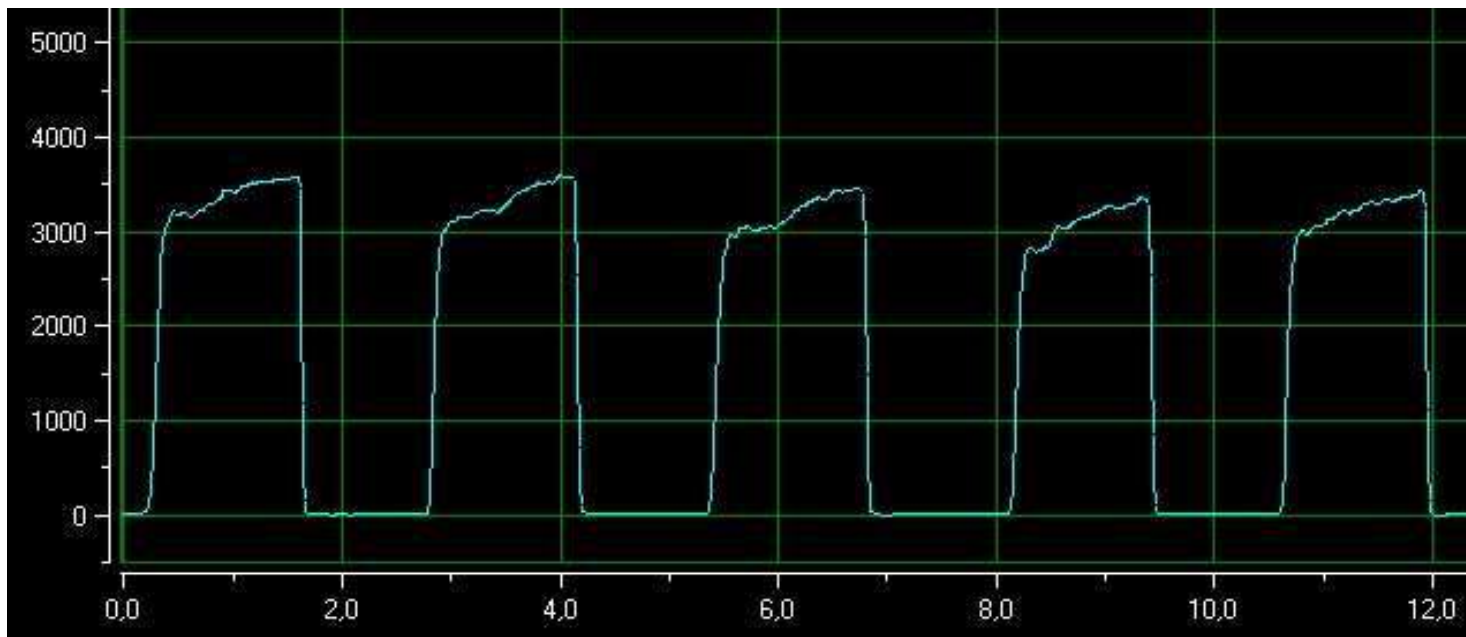
PD42Sr



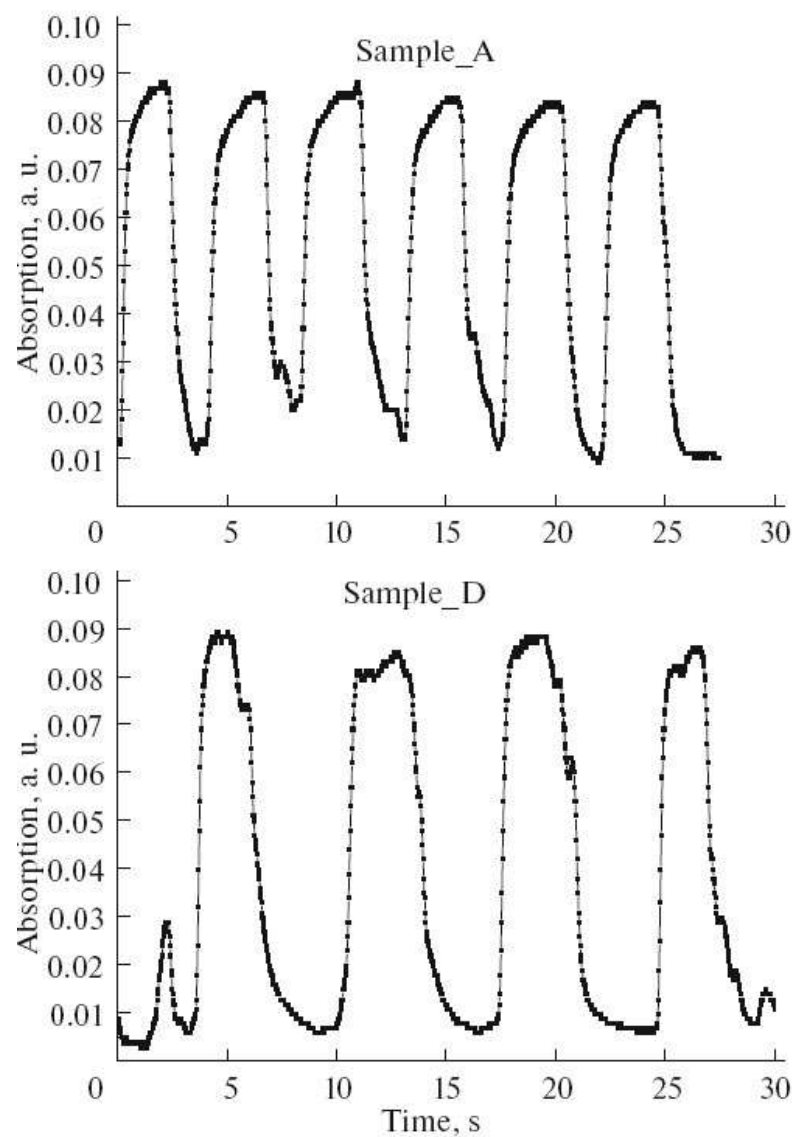
Mainstream Gas Analyzers



mainstream



InAsSb Diode Optical Pairs for Real-Time Carbon Dioxide Sensors



Technical Physics,
2018, Vol. 63, No. 9,
pp. 1390–1395

Fig. 6. Real-time capnograms measured with a resolution of 50 ms.

MID-INFRARED ABSORPTION SPECTROMETER FOR MULTI-SPECIES DETECTION USING LEDs FOR SPACE APPLICATIONS: DEVELOPMENT AND FLIGHT TESTING

(Michael_Villar_Thesis_Final.2017)

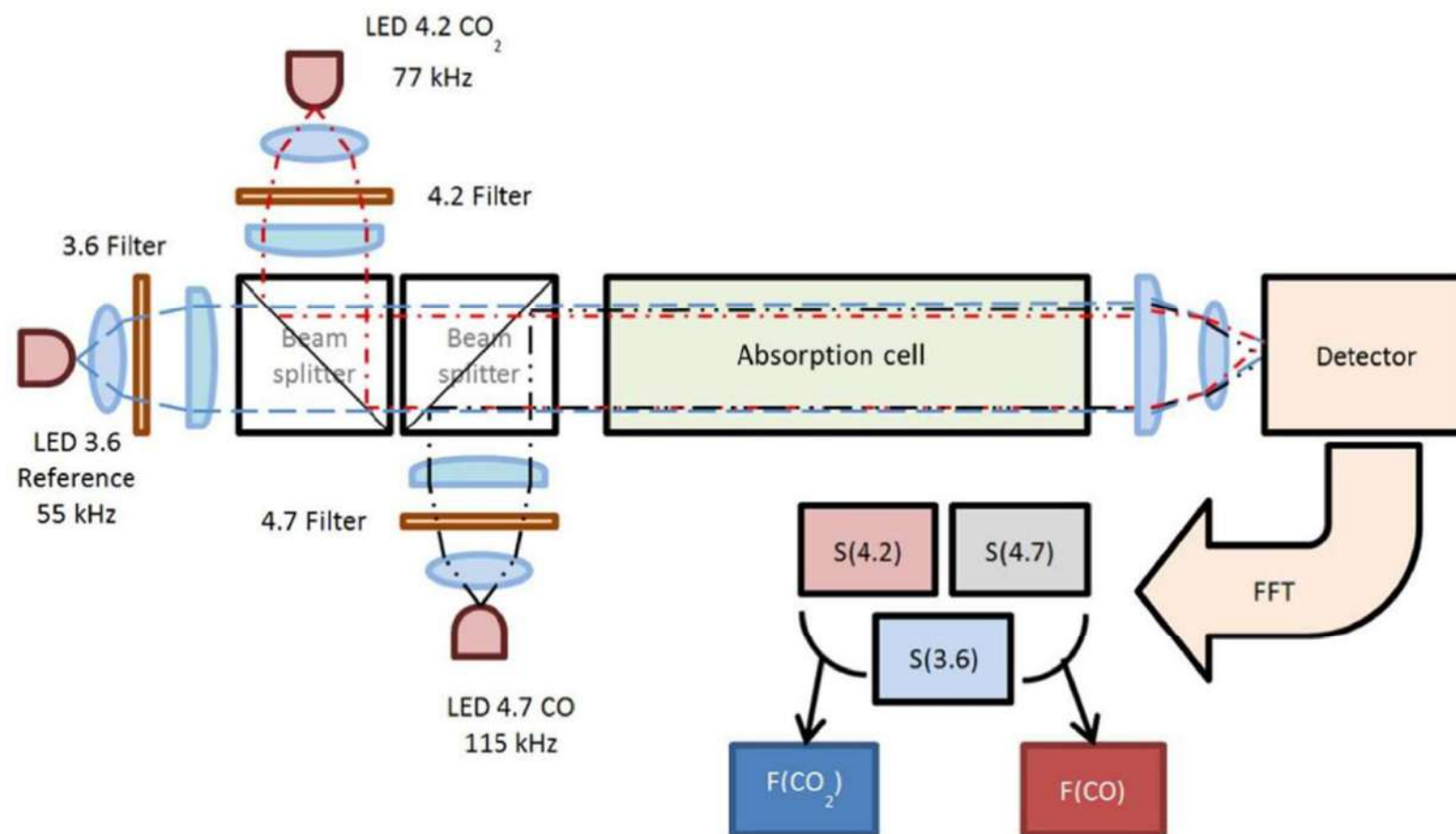


Figure 9: Schematic of sensor optical configuration [2].

Fast spatially resolved exhaust gas recirculation (EGR) distribution measurements in an internal combustion engine using absorption spectroscopy.

J. Yoo et al , Appl Spectrosc. **2015** Sep;69(9):1047-58. doi: 10. 1366/14-07796. Epub 2015 Aug

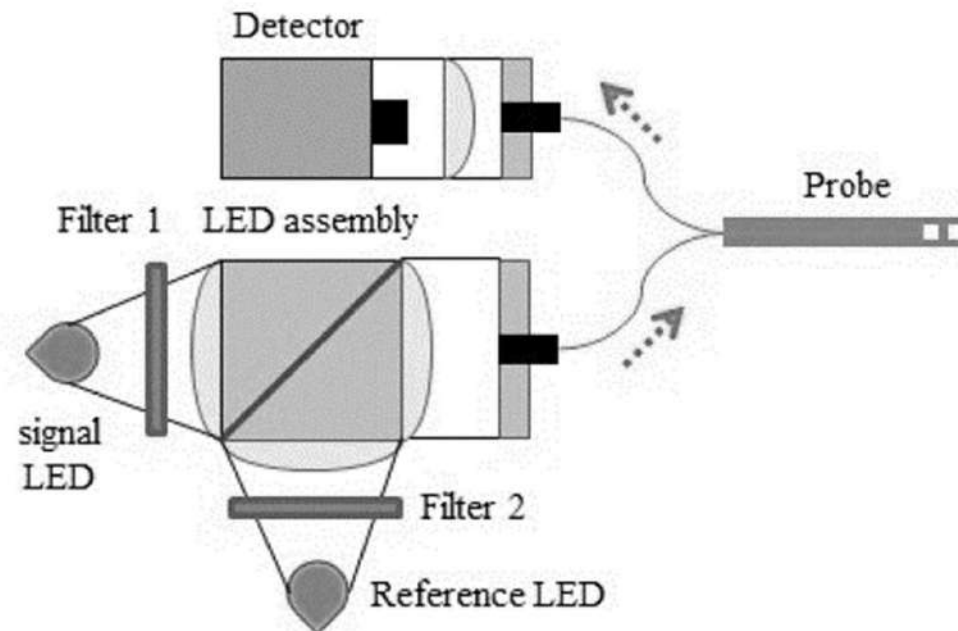
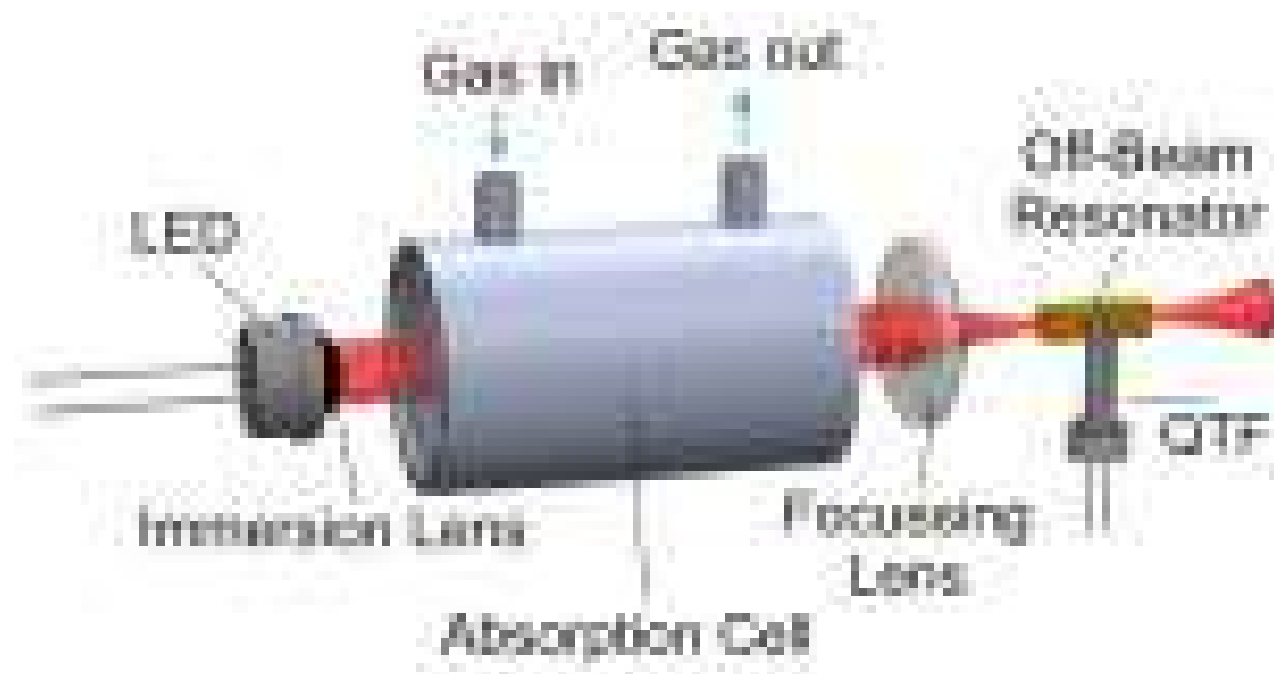


Figure 4. Schematic of EGR sensor and probe. For a detailed probe dimension see Figure 5. HWG NA is 0.05. LEDs and optical components in both the LED and detector assembly were optimized for maximum light coupling with the two HWGs.

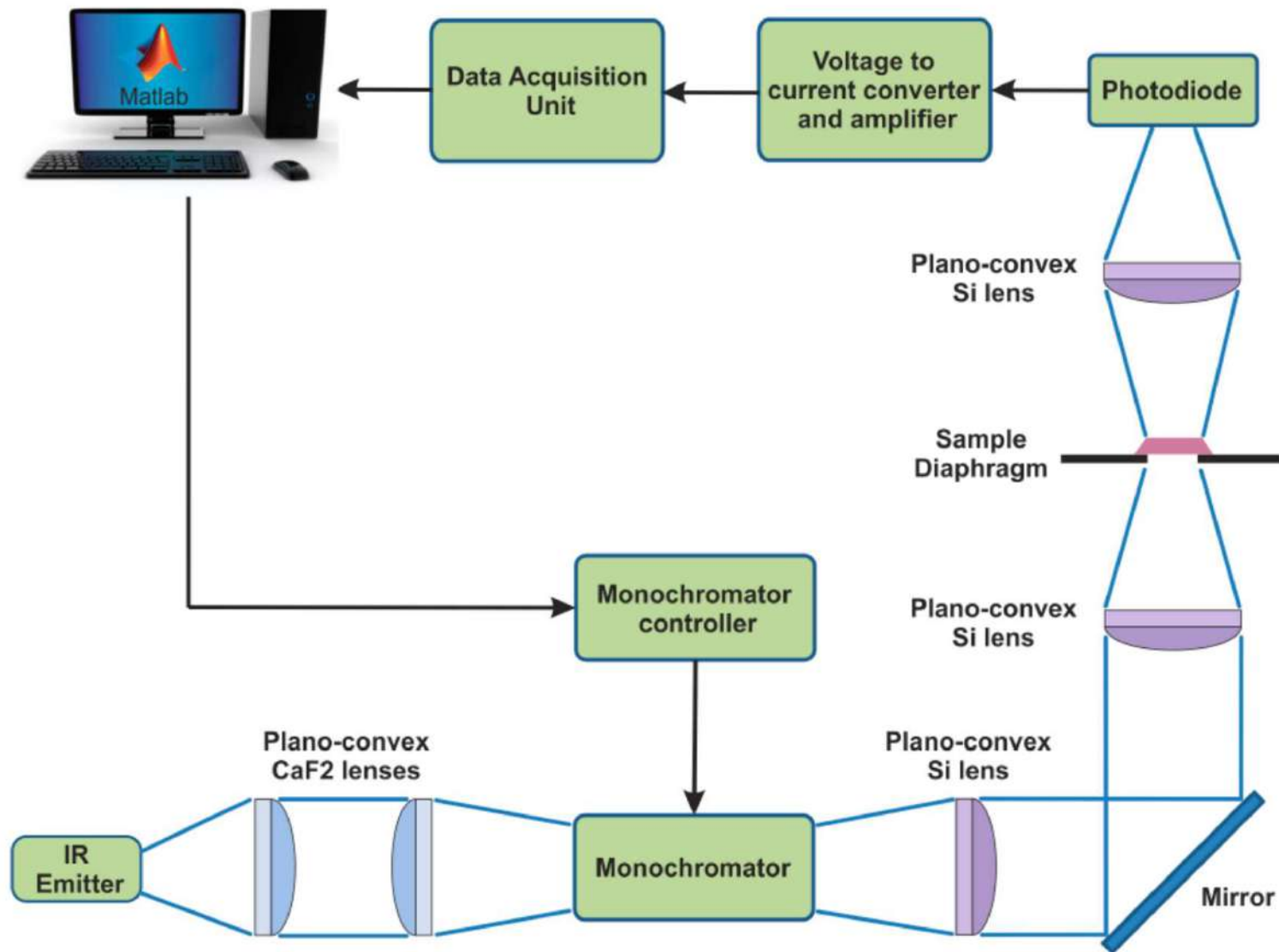
LED-Absorption-QEPAS Sensor for Biogas Plants



Biogas is a mixture with about 40%–60% methane (CH_4), 40%–60% carbon dioxide (CO_2), and traces of nitrogen (N_2), oxygen (O_2), hydrogen sulfide (H_2S), hydrogen (H_2) and ammonia (NH_3). Another important component is water vapor, which is contained until saturation.

An Infrared Absorbance Sensor for the Detection of Melanoma in Skin Biopsies

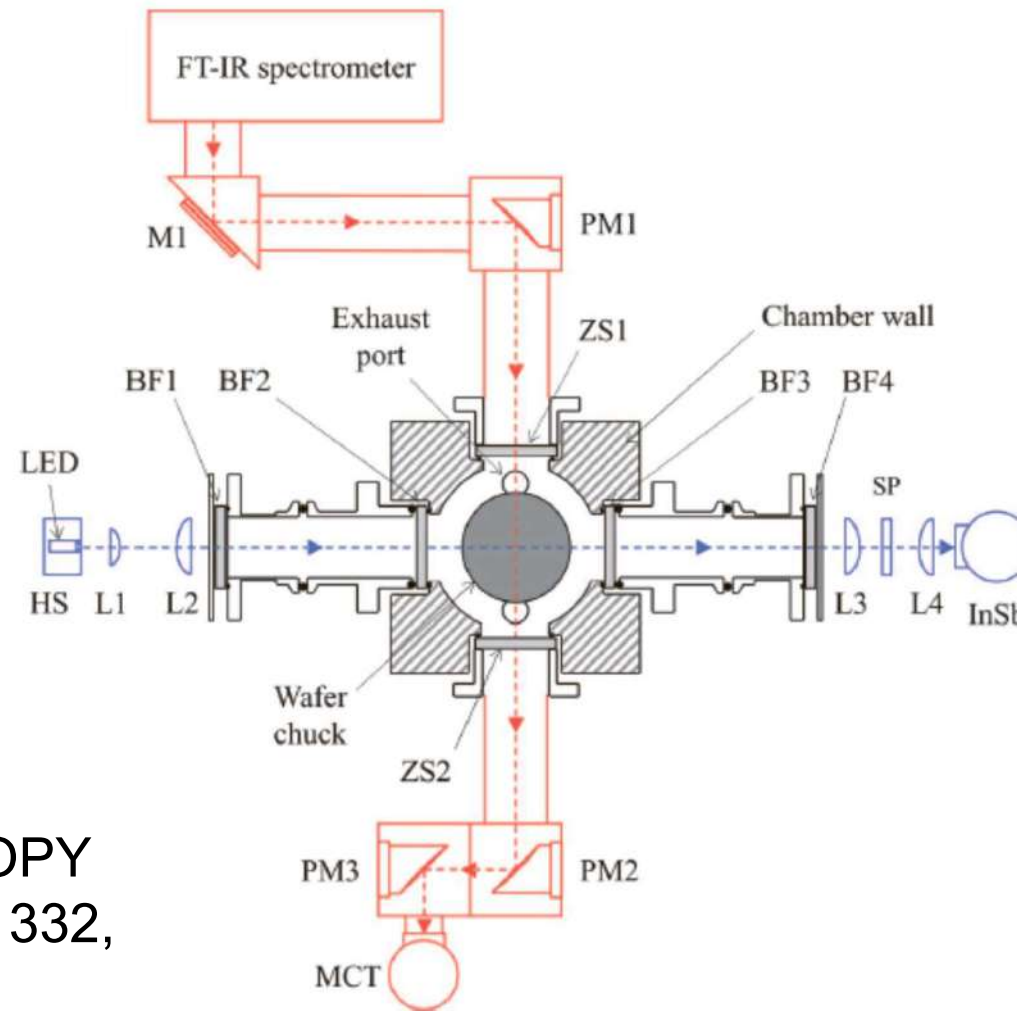
Sensors **2016**, 16, 1659; doi:10.3390/s16101659



Measurements of Metal Alkylamide Density During Atomic Layer Deposition Using a Mid-Infrared Light-Emitting Diode (LED) Source

James E. Maslar,^{*} John Hoang,[†] William A. Kimes, Brent A. Sperling

LED 36 μm



APPLIED SPECTROSCOPY
Volume 69, Number 3, p. 332,
2015

LED/PD spectra in Mid-IR are narrow compared with black body radiation spectrum – no need for additional filters in pyrometer measurements

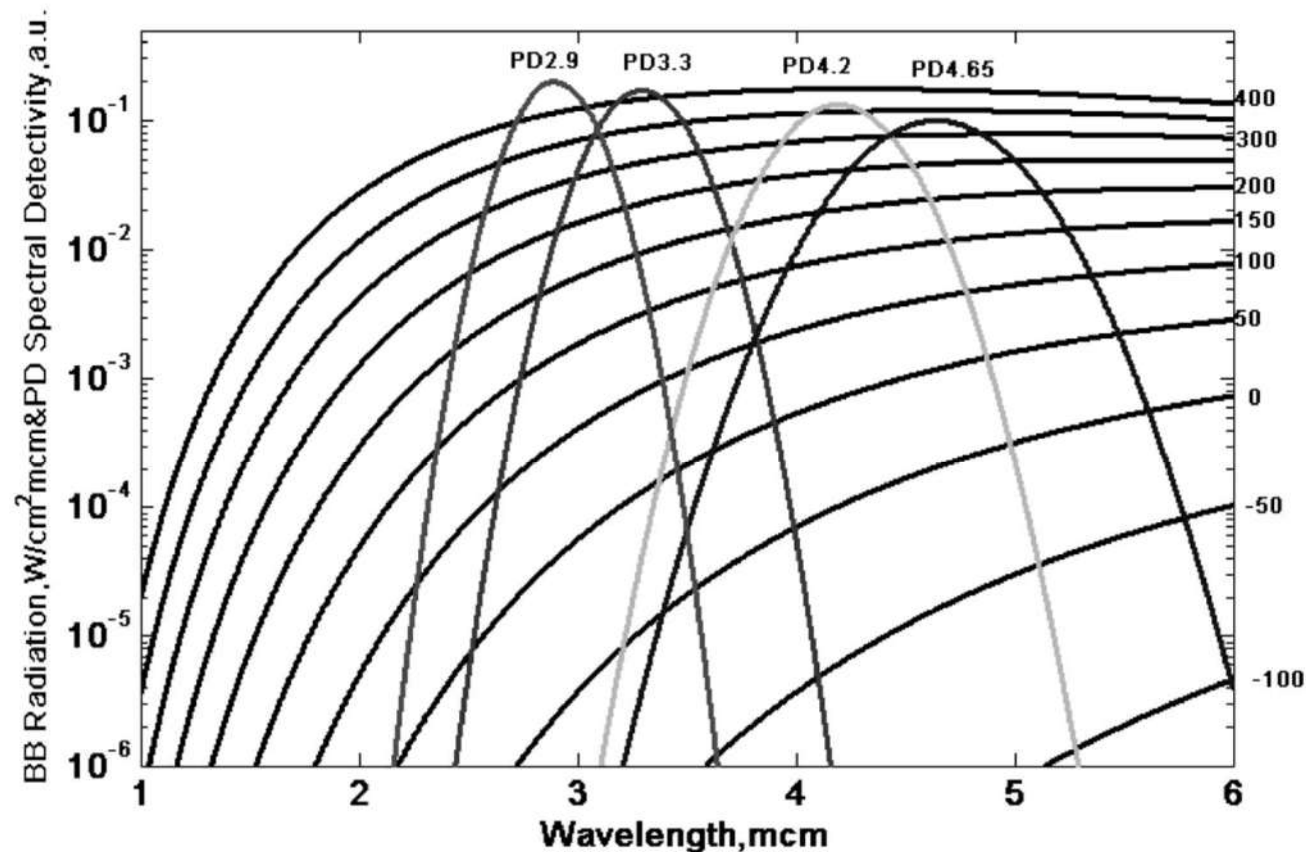


Figure 1. Spectral densities of the BB radiation at different temperatures and spectral distributions of sensitivity of A3B5 photodiodes (approximated by the Gaussian)

4. Small power measurements

Experimental tests of the PD based pyrometer

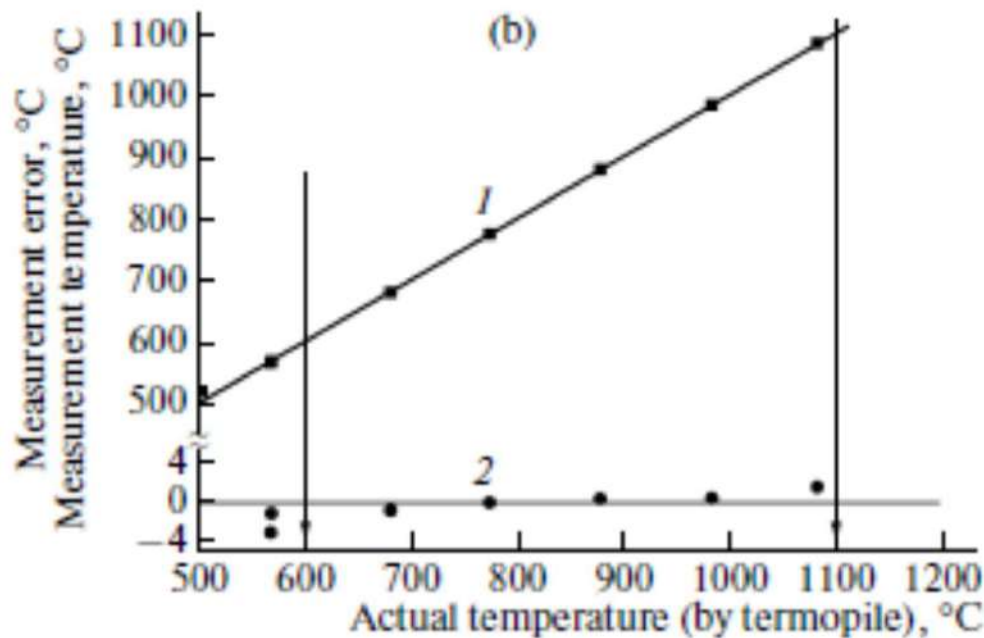


Fig. 3. (a) Experimental PD currents (squares 1), calculated transfer function of the pyrometric sensor (solid line 1), experimental (circles 2) and calculated (dashed line 2) instrumental) errors of the pyrometric sensor. (b) PD sensor readings (1) when measuring the temperature at the fiber tip in contact with the emitter and their deviations (2) from the emitter temperature measured by a thermocouple.

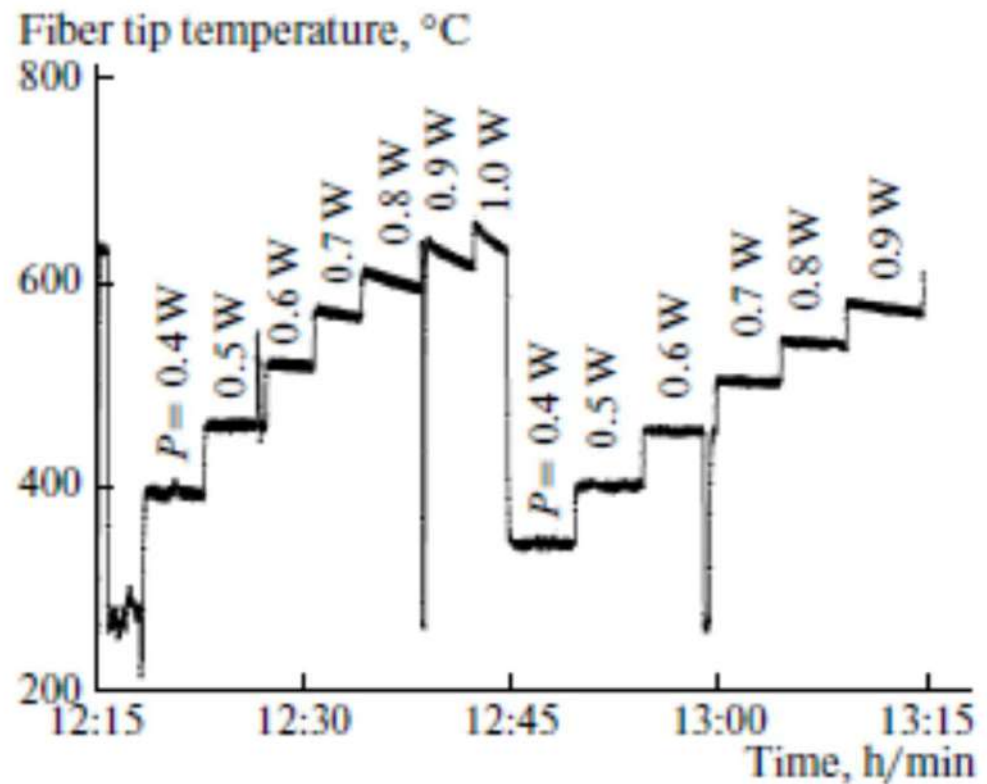


Fig. 4. Experiment on measuring the temperature of a fiber tip heated by laser radiation at various pump powers P .

Semiconductors, 2014, Vol. 48, No. 1, pp. 129–134.

Fiber-coupled laser module

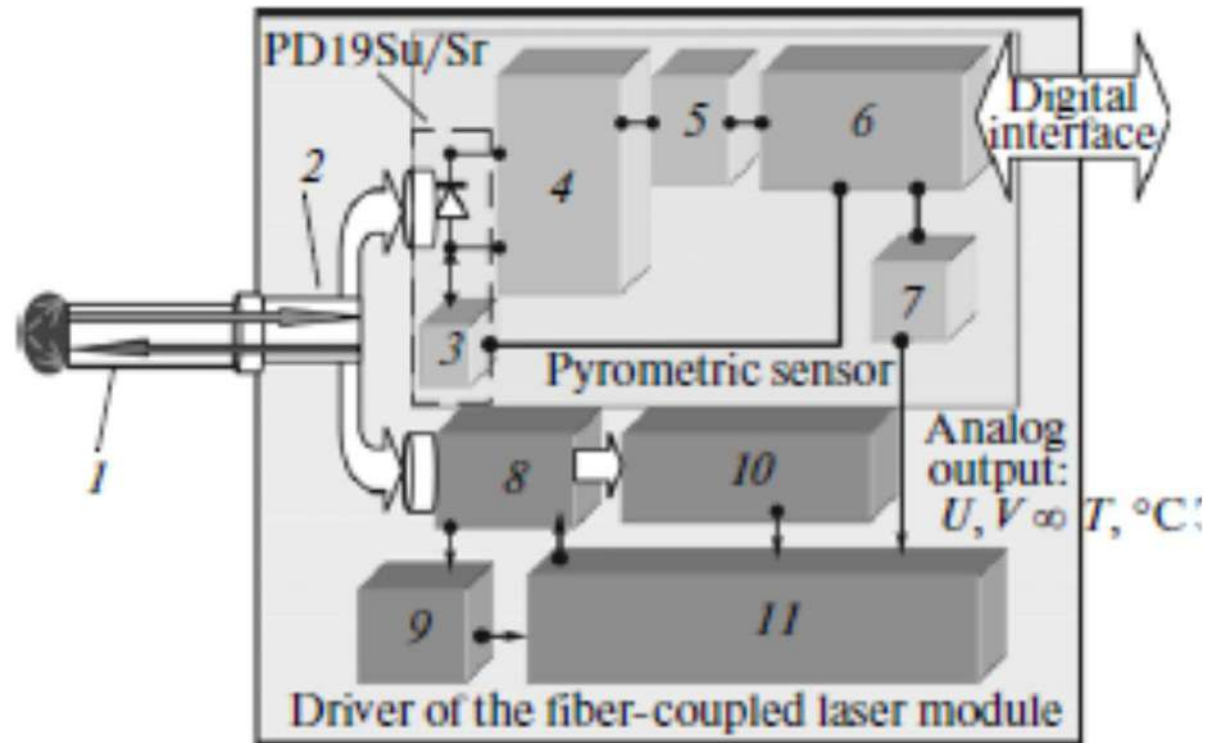


Fig. 2. Block diagram of the fiber-coupled laser module driver with embedded pyrometric sensor: (1) operating fiber, (2) Y-shaped fiber splitter, (3) thermoelectric module (TEM), (4) current-voltage amplifier-converter, (5) ADC, (6) control and processing unit, (7) DAC, (8) laser diode, (9) current sensor, (10) radiation-power sensor, and (11) controllable source of stabilized laser pump current.

Semiconductors, 2014, Vol. 48, No. 1, pp. 129–134.

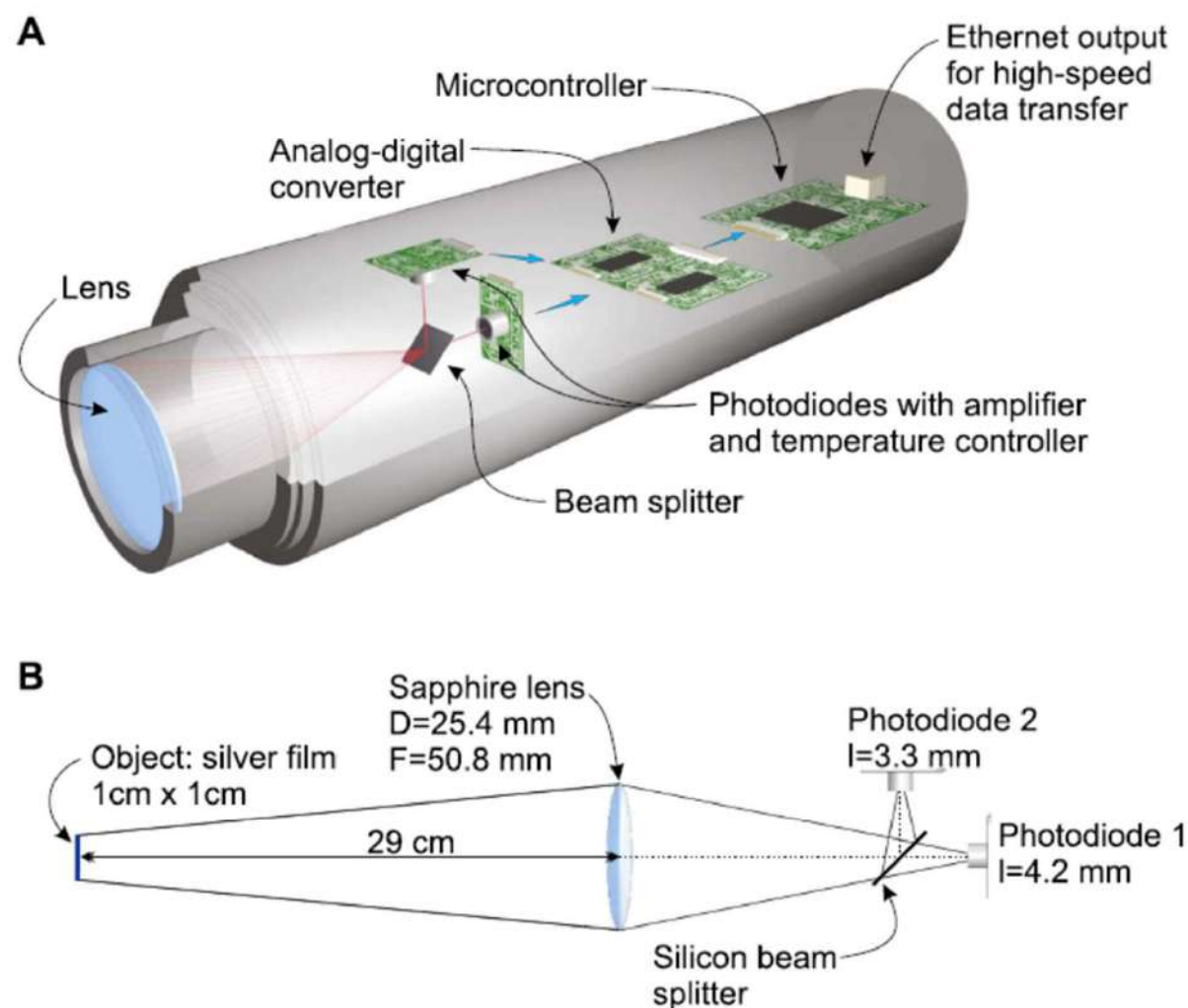


Figure 3. (A) Illustration of the developed pyrometer and (B) its optical schematic.

Time-resolved study of variable frequency microwave processing of silver nanoparticles printed onto plastic substrates

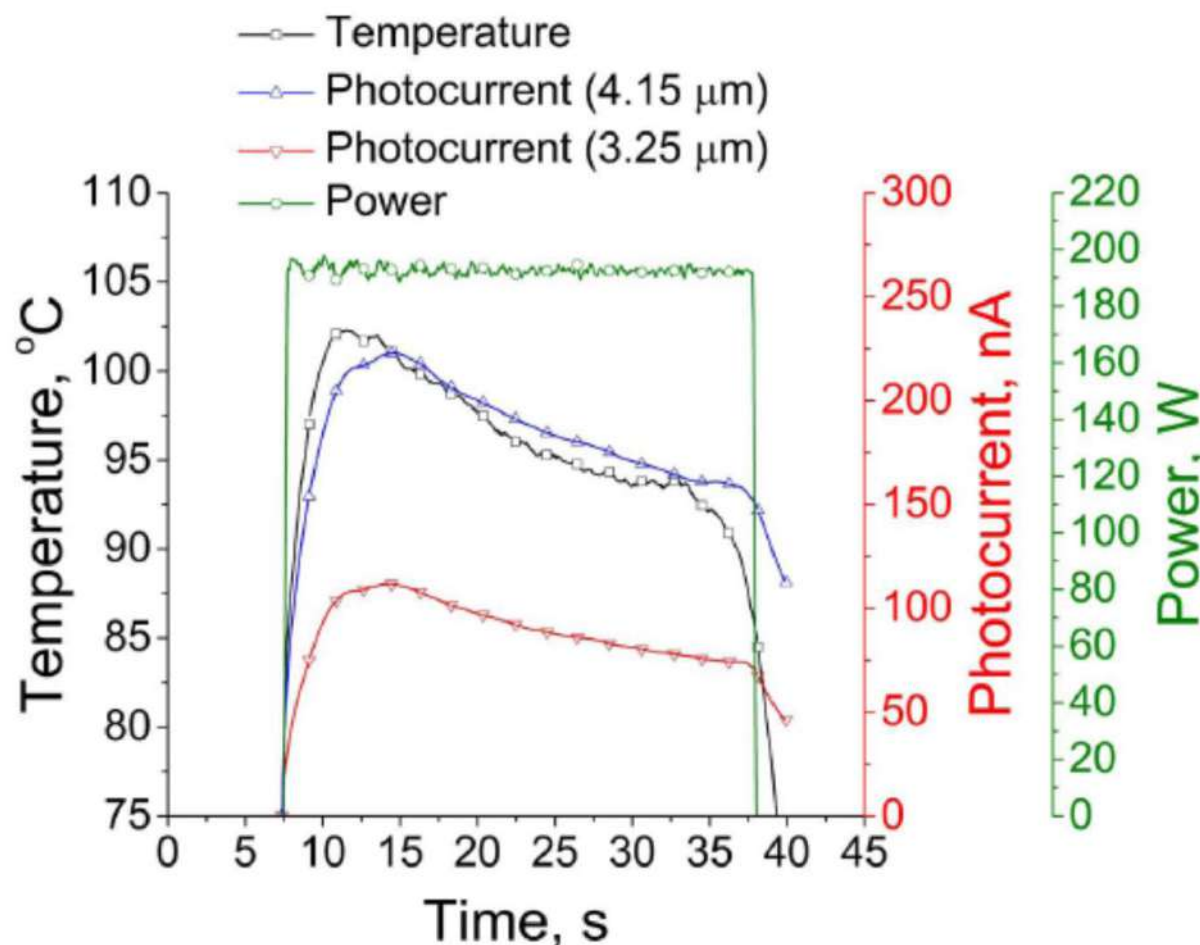


Figure 8. Set of data registered during each experiment and real-time conversion of the photocurrents to temperature.

Дистанционный термометр

Патенты на изобретения №2610073, № 2622239, заявка на изобретение №2016120127 от 25.05.2016.

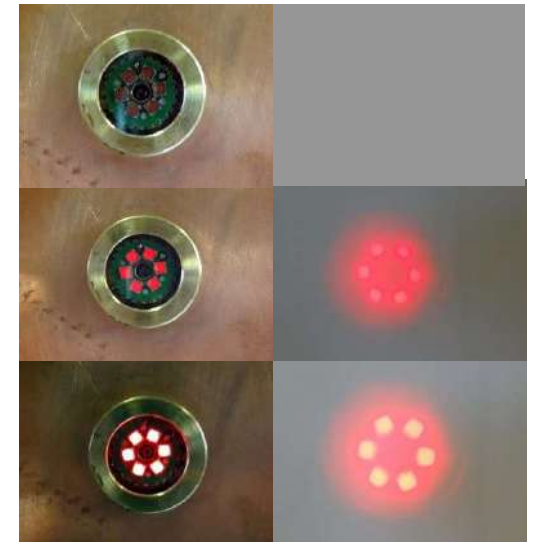
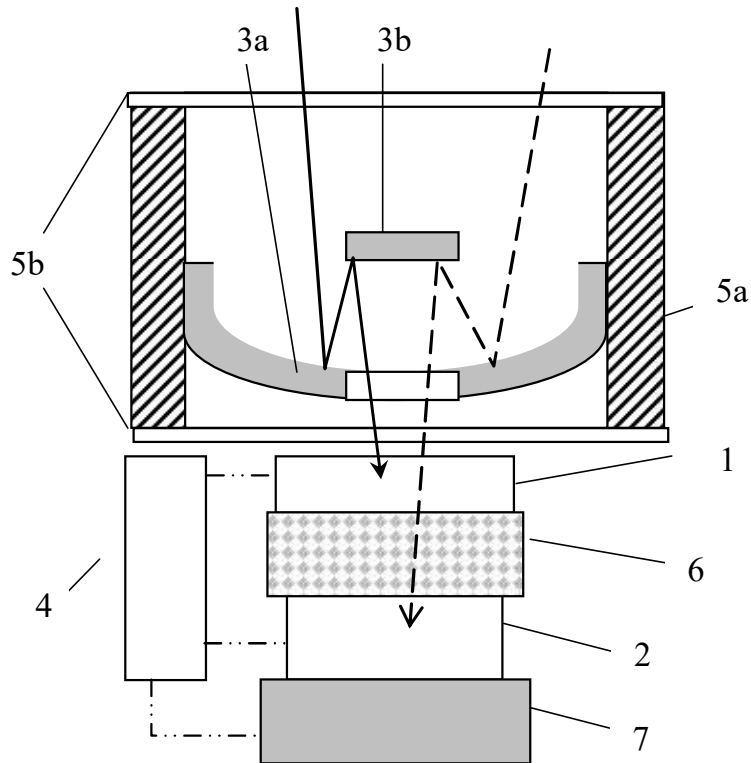
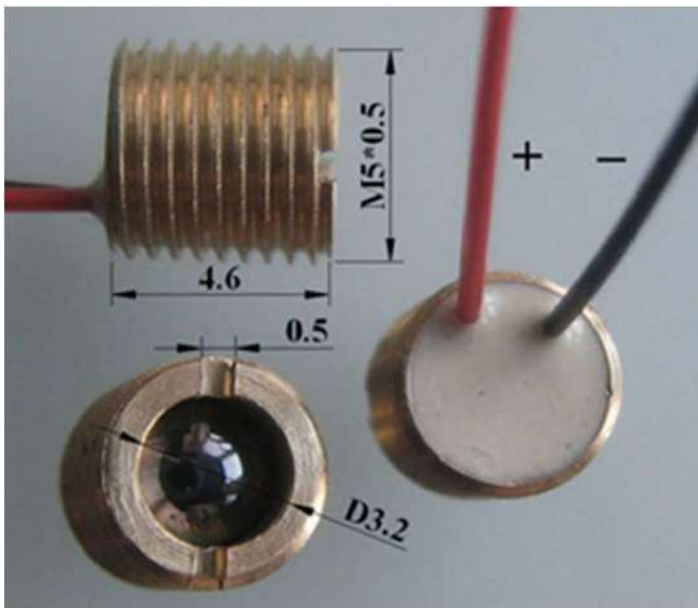


Схема (слева) и фотография (в центре) двухдиапазонного радиационного термометра, где 1- ФД на основе InAs 2- ФД на основе InAsSb, 3a – сферическое зеркало, 3b – плоское зеркало, 4 – считывающая электроника и цепи управления термоэлектрическим охладителем (ТЭО), A/D преобразователь и дисплей, 5a – герметически закрытый корпус, заполненный углекислым газом, 5b – входные окна, 6- оптический клей из халькогенидного стекла, 7- ТЭО. (Иммерсионная линза из кремния диаметром 3.5 мм не показана).

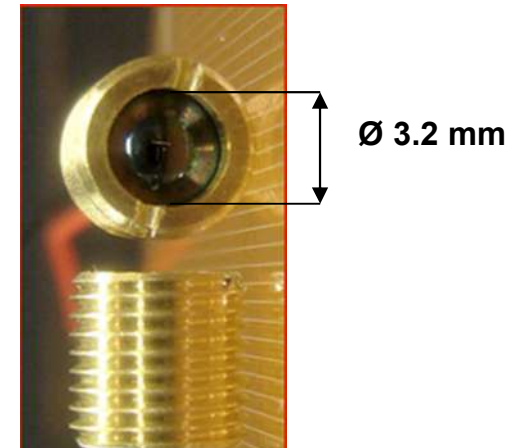
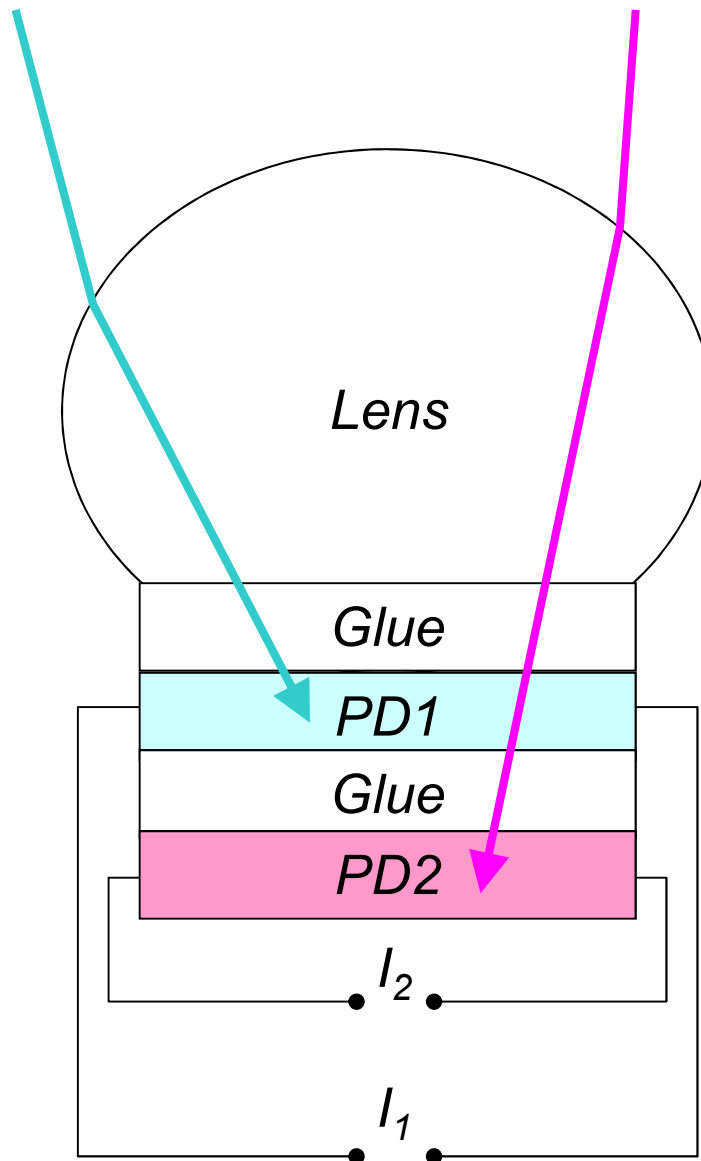
B.A.Matveev et al abstracts of the [MIOMD-XIII](#), Beijing, 18-22 September, 2016, pp. 178-179

Distant temperature/gas measurements



г. Сосногорск, Сажевый завод

Two-color photodiode/pyrometer



Patent application # 2014107335 (011592) from 25.02.2014

Experimental studies of cyclical plasma effects on tungsten

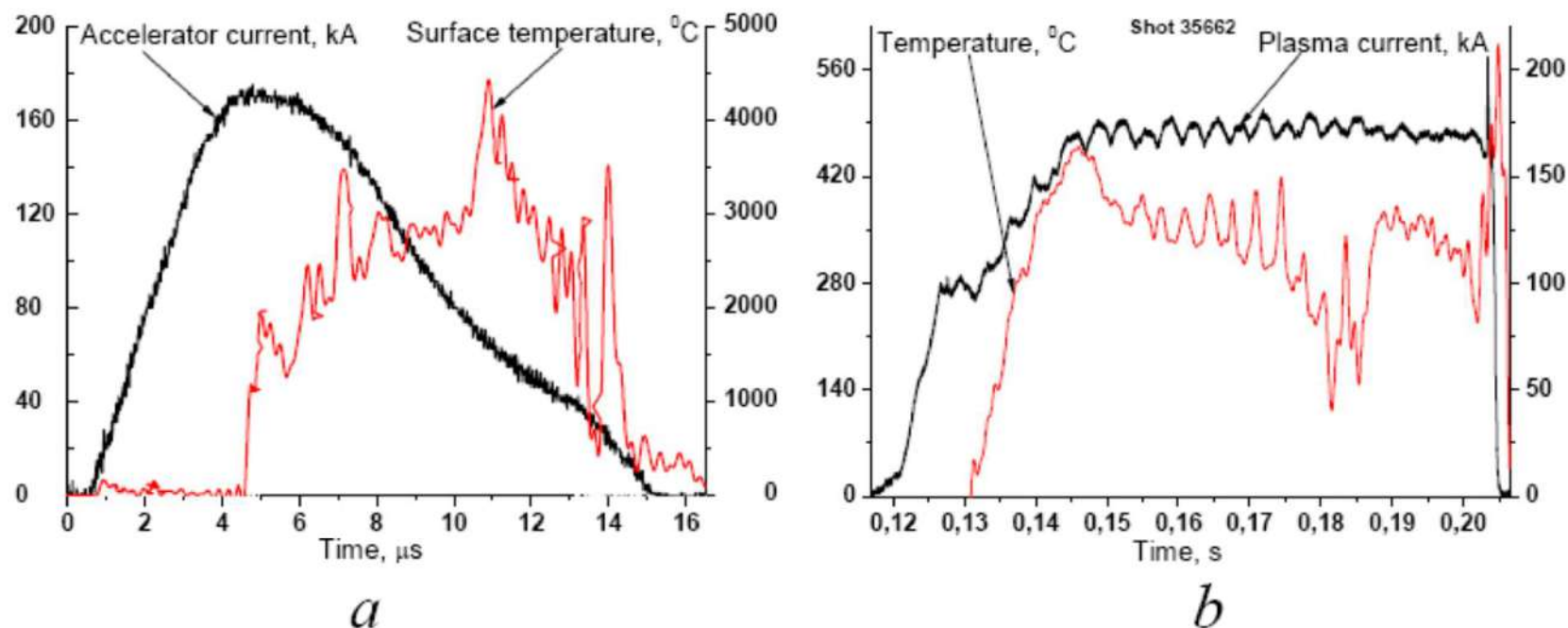


Fig. 2: Dependences of the plasma current and the surface temperature on time. Tungsten irradiated by: a) jet of plasma gun (pulse duration 15 μs; power density $\leq 100 \text{ GW/m}^2$; heat flux factor $\leq 230 \text{ MJm}^{-2}\text{c}^{-1/2}$); b) plasma of Globus-M (pulse duration $\sim 70 \text{ ms}$; power density $\leq 2.5 \text{ MW/m}^2$; heat flux factor $\leq 1 \text{ MJm}^{-2}\text{c}^{-1/2}$)

42nd EPS Conference on Plasma Physics

ТАБЛИЦА 1

Analyzer type	LED type	L [cm]	Measuring range and gas type	Integration time	Accuracy	Reference
NDIR	Flat plate LED 2.3 μm	50	5-100% CH_4	—	0.1%	[10]
	Flat plate LED 2.3 μm	150	1-10% CH_4	—	—	[12]
	Flat plate LED 3.4 μm	—	0-5% CH_4	2 s	250 ppm v/v	[32]
	Immersion lens LED 3.4 μm	—	> 135 $\mu\text{g C}_2\text{H}_5\text{OH/l}$	—	—	[33]
	Flat plate LED 4.3 μm	4.5	0-1% CO_2	—	> 12 ppm v/v.	[7]
	Flat plate LED 4.3 μm	—	0.03-10% CO_2	—	—	[14]
	Flat plate LED 4.3 μm	8	0.1 CO_2	—	—	[23]
	Immersion lens LED 4.3 μm	0.2	0-10% CO_2	30 ms	5%	[5]
	Immersion lens LED 4.3 μm	0.8	0-4% CO_2	4 ms	0.1% v/v.	[24]
	Immersion lens LED 4.3 μm	8	0-10% CO_2	4 ms	30 ppm v/v.	[9]
	Immersion lens LED 4.3 μm	2-5	0-5% CO_2 5.1-10% CO_2 10.1-15% CO_2 15.1-20% CO_2	<30 ms	$\pm 0.2\%$ $\pm 4\%$ $\pm 6\%$ $\pm 10\%$	[26]
	Immersion lens LED 4.7 μm	8	0-4% CO	4 ms	400 ppm v/v	[9]
PA	Flat plate LED 4.2 μm	—	CO_2	—	—	[29]
	Immersion lens LED 3.4 μm	4	40-60% CH_4	10 s	1%	[27]

Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова

СВЕТОДИОДЫ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР A^3B^5 В ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЯ 2014-2018 . Оптика и спектроскопия, 2019 (в печати)



Спасибо за понимание!

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. // Успехи прикладной физики. 2015. Т.3. № 1. С. 77.
2. Bui D. A., Hauser P. C. // Analytica Chimica Acta. 2015. V. 853. P. 46; <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2014.09.044>
3. Yeh P., Yeh N., Lee C.-H., Ding T.-J. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. V.75. P. 461 <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040>.
4. Матвеев Б.А. // Фотоника. 2014. №6 (48). С.80.
5. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Сотникова Г.Ю. // ЖТФ. 2018. Т. 88. №9. С. 1433. DOI: 10.21883/JTF.2018.09.46433.35-18; Aleksandrov S. E., Gavrilov G. A., Kapralov A. A., Matveev B. A., Remennyi M. A., Sotnikova G. Yu. // Technical Physics. 2018. V. 63. No. 9. P. 1390. DOI <http://dx.doi.org/10.1134/S1063784218090025>.
6. Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А. // ФТП. 2019. Т.53. № 2. (в печати).
7. Eberhardt A., Scholz L., Westermann S., Sachs T., Langer M., Wöllenstein J., Palzer S. // Procedia Engineering. 2014. V.87. P.1318. doi: 10.1016/j.proeng.2014.11.690
8. Tkachuk M., Suchalkin S. Патент США № 8957376, 2015.
9. Thurmond K., Loparo Z., Partridge W., Vasu S. S. // Applied Spectroscopy. 2016. VI. 70. №6. P. 962. DOI 10.1177/0003702816641261
10. Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Sleptsov V. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. V. 108. 012036. doi:10.1088/1757-899X/108/1/012036
11. Fanchenko S. S., Baranov A. M., Savkin A. V., Samotaev N. N. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2016. V. 151, 012021. doi:10.1088/1757-899X/151/1/012021
12. Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Petukhov A., Kalinina K., Zhurtanov B., Velikotny M. // IEEE Workshop on Environmental, Energy and Structural Monitoring Systems (EESMS), Trento, Italy, July 9-10, 2015. (EESMS) Proceedings. 2015. P.146. 9-10 July 2015, doi: 10.1109/EESMS.2015.7175868
13. Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., Kapralov A.A., Sotnikova G.Yu. // Physics Procedia. 2015. V. 73. P.177. DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.151.
14. Безязычная Т.В., Богданович М.В., Кабанов В.В., Кабанов Д.М., Лебедев Е.В., Паращук В.В., Рябцев А.Г., Рябцев Г.И., Шпак П.В., Щемелев М.А., Андреев И.А., Куницына Е.В., Шерстнев В.В., Яковлев Ю.П. // ФТП. 2015. Т. 49. № 7. С. 1003. T. V. Bezazychnaya, M. V. Bogdanovich, V. V. Kabanov, D. M. Kabanov, Y. V. Lebiadok, V. V. Parashchuk, A. G. Ryabtsev, G. I. Ryabtsev, P. V. Shpak, M. A. Shchemele, I. A. Andreev, E. V. Kunitsyna, V. V. Sherstnev, and Yu. P. Yakovlev, Semiconductors. 2015. V.49. P.980. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063782615070052>
15. Dinh T.-V., Choi In-Y., Son Y.-S., Kim Jo-Ch., // Sensors and Actuators B Chemical. 2016. V. 231. P. 529. DOI 10.1016/j.snb.2016.03.040.
16. Lisakov S.A., Sidorenko A.I., Zorin I.S., Sytin E.V. // 19th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MICRO/NANOTECHNOLOGIES AND ELECTRON DEVICES EDM. 2018. P. 391. June 29 - July 3, 2018, Erlagol, Russia.
17. Fanchenko S., Baranov A., Savkin A., Somov A., Calliari L. // Multi-wavelength IR method for monitoring air pollution in cities. IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Trento, Italy, 12-15 Sept. 2016. DOI:10.1109/ISC2.2016.7580867
18. Villar M. S. Электронный ресурс [Режим доступа]: http://eld.fcla.edu/CF/CFE0006671/Michael_Villar_Thesis_Final
19. Villar M., Thurmond K., Urso J., Parupalli A., Ninnemann E., A. Terracciano, Kapat J., Vasu S. // AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, Orlando, FL, September, 12 – 14. 2017. ISBN: 978-1-62410-483-1. doi:10.2514/6.2017-5370
20. Terracciano A. C., Thurmond K., Villar M., Urso J., Ninnemann E., Parupalli A., Loparo Z., Demidovich N., Kapat J. S., Partridge W. P. Jr., Vasu S.S. // New Space. 2018. V. 6, № 1 Published Online: 1 Mar 2018 <https://doi.org/10.1089/space.2017.0044> DOI: 10.1080/05704928.2018.1474766
21. Maslar J. E., Hoang J., Kimes W. A., Sperling B. A. // Applied Spectroscopy. 2015. V. 69. № 3. P.332. DOI: 10.1366/14-07695
22. Fleming L., Gibson D., Song Sh., Li Ch., Reid S. // Surface & Coatings Technology. 2018. V. 336. P. 9. <http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.09.033>
23. Camargo E. G., Goda Y., Morohara O., Fujita H., Geka H., Ueno K., Shibata Y., Kuze N., "NDIR gas sensing using high performance AlInSb mid-infrared LEDs as light source", Proc. SPIE 10404, Infrared Sensors, Devices, and Applications VII, 104040R (30 August 2017); doi: 10.1117/12.2272905; <https://doi.org/10.1117/12.2272905>
24. Yoo J., Prihodko V., Parks J.E., Perfetto A., Geckler S., Partridge W. P. // Appl Spectrosc. 2015. V.69. № 9. P.1047; doi: 10.1366/14-07796. Epub 2015 A
25. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Сотникова Г.Ю. // ПЖТФ. 2016. Т. 42, № 5. С.81; Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., Kapralov A.A.; Sotnikova G.Yu. // Tech. Phys. Lett. 2016. V.42, №3. P. 263. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785016030020>.
26. Treaton 2018, QuRe® sensor. Электронный ресурс [Режим доступа]: <http://www.treat-on.com/tovary/oem-medical-solutions/product/228/?http://www.treat-on.com/tovary/oem-medical-solutions/product/228/>=
27. Köhring M., Böttger S., Willer U., Schade W. // Sensors (Basel). 2015. V. 15. № 5. P. 12092 (2015); doi: 10.3390/s150512092.
28. Wittstock V., Scholz L., Bierer B., Perez A. O., Wöllenstein J., Palzer S. // Sensors and Actuators B. 2017. V. B 247. P. 930; <http://dx.doi.org/10.1016/j.snb.2017.03.086>
29. Scholz P., Ortiz A., Knobelspies P. S., Wöllenstein J., Palzer S. // Procedia Engineering. 2015. V. 120. P. 1233. Available online at www.sciencedirect.com/1877-7058.
30. Sotnikova G.Yu., Aleksandrov S.E., Gavrilov G.A., "Performance analysis of diode optopair gas sensors", Optical Sensors 2009, edited by Francesco Baldini, Jiri Homola, Robert A. Lieberman, Proc. of SPIE. 2009. V. 7356, P. 73561T. doi: 10.1117/12.820668
31. Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Сотникова Г.Ю. // ПЖТФ. 2014. Т. 40. № 16. С.58; Aleksandrov S.E.; Gavrilov G.A.; Sotnikova G.Y. // Tech.Phys.Lett. 2014. V.40, №8. P. 704. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/S1063785014080161>
32. Кижаяев С.С., Калинина К.В., Петухов А.А., Гурина Т.И., Миронова А.Н., Черняев А.В., Стоянов Н.Д., Салихов Х.М., "ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СВЕТОДИОДОВ СРЕДНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ InAs(Sb,P) ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ CH₄", Труды 2-ой Российско-Белорусской научно-технической конференции «ЭЛЕМЕНТАРНАЯ БАЗА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ: ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ имени О. В. Лосева», Н.Новгород, 17-19 ноября 2015 года, стр. 163-166. ISBN 978-5-9903092-3-8
33. Лазерные системы ("Алкорамка") 2018. Электронный ресурс [Режим доступа]: <http://www.lsystems.ru/en/alcoframes/?http://www.lsystems.ru/en/alcoframes/>=

Б.А. Матвеев, Г.Ю. Сотникова
**СВЕТОДИОДЫ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА НА
 ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР $\text{Al}_x\text{V}^{5-5-x}\text{Sb}$ В ГАЗОАНАЛИТИЧЕСКОМ
 ПРИБОРОСТРОЕНИИ. ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕНЕНИЯ
 2014-2018 . Оптика и спектроскопия, 2019 (в печати)**