

ПЕТДЕСЕТ ГОДИНИ ОТ СЪЗДАВАНЕТО НА ПОЛУПРОВОДНИКОВИЯ ЛАЗЕР

Л. К. Лазов

Технически университет, Габрово

Резюме. Пионерните разработки, свързани с откритието на лазера в това число и на полупроводниковия лазер преди 50 години, са едни от най-важните научни достижения на човечеството през изминалия XX век. Те са оказали и оказват съществено влияние за техническото развитие на обществото ни. Показана е решаващата роля на цяла плеяда американски (Hall, Holonyak, Nathan, Rediker, Kroemer, Hayashi) и руски (Басов, Наследов, Ривкин, Алфьоров, Попов) учени за развитието на полупроводниковата и лазерната техника. Направена е ретроспекция на борбата на идеи и етапите, през които преминават различни екипи от забележителни учени от водещи научни лаборатории в САЩ (General Electric, Lincoln Laboratory, Bell Telephone, IBM) и Русия (Физико-технически институт имени А. Ф. Иоффе РАН, Физический институт им. П. Н. Лебедева, РАН). Доказателство за значимостта на тези фундаментални открития е фактът, че само за 50 години, изминали от откриването на лазера, на десет учени е присъдена Нобелова награда за изследвания, свързани с разработката на принципите и приложението на лазерите.

Keywords: semiconductor laser, 50 years, double heterostructure laser

Въведение

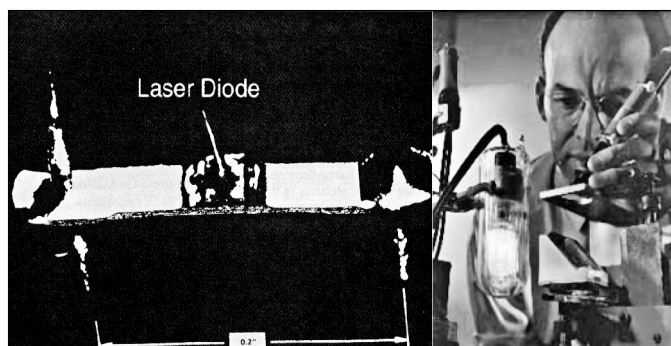
Оптичните и лазерните технологии са ключови технологии за развитието на икономиката и просперитета на обществото ни през XXI век. Те се явяват иновационният двигател за развитие на почти всички индустриални сектори и области на науката – медицина, машиностроене, електроника, информационни и комуникационни технологии, нанотехнологии, метрология, спектроскопия и др.

Полупроводниковите лазери са лазери, при които като активна среда се използват полупроводникови материали. Поради своите специфични характеристики днес те са едни от най-разпространените лазери, имащи широко приложение в различни области на нашия живот. Без да преувеличаваме, можем да твърдим, че те са навсякъде около нас – от супермаркета (баркод скенери), до компютрите (CD и DVD плъри), от оптическия запис и разчитане на информация до прецизните измервания в метрологията и обработката на материали в машиностроенето

(закаляване, заваряване и др.). Така свикнахме с тях, че дори не ги забелязваме, а като погледнем назад, ще установим, че са изминали само 50 години от тяхното създаване в научните лаборатории.

Началото

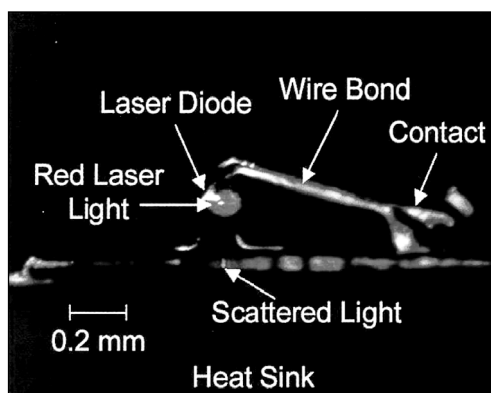
Почти веднага след откриването на рубиновия лазер от Мейман (Maiman, 1960) идеята полупроводниковият диод да се използва за лазерен източник завладява много учени. В надпреварата се впускат редица научни колективи от водещи лаборатории в САЩ като General Electric-Schenectady (Hall, 1962), General Electric-Syracuse (Holonyak, 1962), IBM (Nathan et al., 1962), Lincoln Laboratory – Massachusetts Institute of Technology (Rediker, 1989) и в Съветския съюз института „Лебедев” (Basov et al., 1961) и Физико-техническият институт „А. Ф. Йофе” (Alferov & Kazarinov, 1963).



Фиг. 1. Първият полупроводников лазер, създаден през 1962 г. от Robert N. Hall, General Electric (Schenectady): материал GaAs; импулсен режим на работа, работна среда от течен He или N₂¹⁾

Повечето от изследователските екипи базират своите научни проучвания върху материала GaAs (галиев арсенид). През септември 1962 г. щастието и късметът спохождат първо екипа на Robert N. Hall от General Electric (Schenectady) (Hall et al., 1962). Той получава кохерентно лазерно лъчение с дължина на вълната 850 nm (близката инфрачервена област на електромагнитния спектър). Така създаденият първи полупроводников лазер е много неефективен, изисква висока храняща мощност и работи само в режим на много къси импулси и среда на течен азот (Фиг.1). Само няколко месеца по-късно групата на Nick Holonyak от General Electric (Syracuse) успява да получи импулсно лазерно лъчение във видимата област

(Holonyak & Bevacqua, 1962) (Фиг.2). Полупроводников лазер създава и екипът, ръководен от Николай Басов в Съветския съюз през декември 1962 г. (Фиг.3). Почти едновременно и независимо един от друг няколко екипа от различни лаборатории достигат до откритието, т.е. то е витаело във „въздуха.“ Зад тези реални успехи се крият не само упорит труд и амбиция, но и сериозни предпоставки, свързани с предварителни натрупвания в тази област.

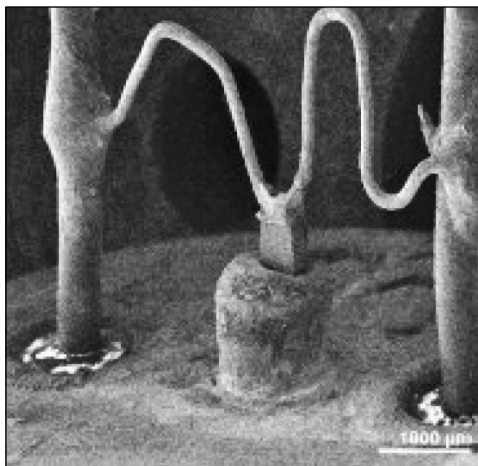


Фиг. 2. Полупроводниковият лазер на екипа на Nick Holonyak 1962 г.
(излъчващ във видимата област)

Историческите проучвания показват, че първото предложение за полупроводников лазер прави John von Neumann през 1953 г., публикувано едва през 1987 г. (Neumann, 1987). Basov et al. (1960) за първи път през 1959 г. дискутират възможността за създаване на лазер на базата на полупроводникови материали. Използването на р-п прехода за целите на лазерната генерация е предложено през 1961 г. (Basov et al., 1961). Изследвайки излъчвателните свойства на р-п прехода, екипът на Д. Н. Наследов и С. М. Ривкин също достига до извода, че при голяма стойност на тока се появяват признаци на стимулирана емисия (Nasledov et al., 1962).

Реално полупроводников лазер с електронно възбуждане групата на Н. Г. Басов (О. В. Богданкевич и А. Г. Девятков) реализира за първи път през 1964 г. През същата година Н. Г. Басов, А. З. Грасюк и В. А. Катулин съобщават и за създаването на полупроводников лазер с оптично напompване.

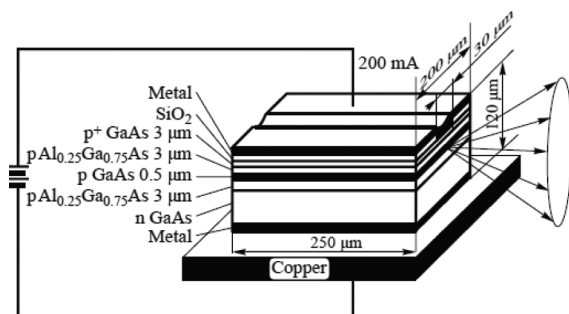
За своите фундаментални изследвания и значими резултати в областта на полупроводниковите лазери Б. М. Вул, О. Н. Крохин, Д. Н. Наследов, А. А. Рогачъов, С. М. Ривкин, Ю. М. Попов, А. П. Шотов, Б. В. Царенков през 1964 г. са наградени с най-високата държавна награда на СССР – Ленинска премия.



Фиг. 3. Инжекционният лазер, създаден във ФИАН – СССР, декември 1962 г. (импулсен режим; мощност 1 mW; работещ при температурата на течен азот) (Попов, 2011)

Следващият етап в развитието на полупроводниковите лазери е свързан с изследванията на Жорес Алфьоров през 1963 г. При защитата на своята дисертация той прави извода, че в хомогенен полупроводник р–п преходът не може да осигури оптималните параметри за работа на редица електронни прибори и предлага за тяхното получаване да се използва хетероструктура. Алфьоров предполага, че лазери на основата на хетероструктура (тънки сандвич-структури) могат да осигурят непрекъснат режим на генерация при стайна температура с много по-висока ефективност (Alferov et al., 1963). Независимо същото твърдение в своя статия прави и Хербърт Крюмер в САЩ (Kroemer, 1963). Първоначално Ж. И. Алфьоров прави опит да създаде двойна хетероструктура на базата на $\text{GaP}_{0,15}\text{As}_{0,85}$ –GaAs по метода на газофазовата епитаксия. Създаденият от този материал лазер обаче работи при температурата на течния азот. На практика трябва да минат още няколко години на усилен търсения, за да може групата на Ж.И. Алфьоров (Д. Третьяков, Д. Гарбузов, Е. Портной, В. Корольков и В. Андреев) да намери подходящото полупроводниково съединение. Тройно съединение от твърд разтвор на AlGaAs се оказва подходящият материал – годината е 1967. Създадена е класическата хетеродвойка GaAs–AlGaAs. Посредством течна фазова епитаксия LPE (liquid phase epitaxy) са получени два различни хетеропрехода между AlGaAs (р- и n-тип) и трети в GaAs. Дебелината на областта на GaAs е много тънка, под 1 μm (Фиг.4). Това може да се разглежда като един от първите примери за реализиране на нанотехнология.

Интересен факт и тук е, че само с разлика от няколко месеца друга група учени в САЩ (фирма IBM) достига до същата хетероструктура $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}-\text{GaAs}$ – като че ли научните идеи са своеобразен „флуид“, който се носи около планетата.



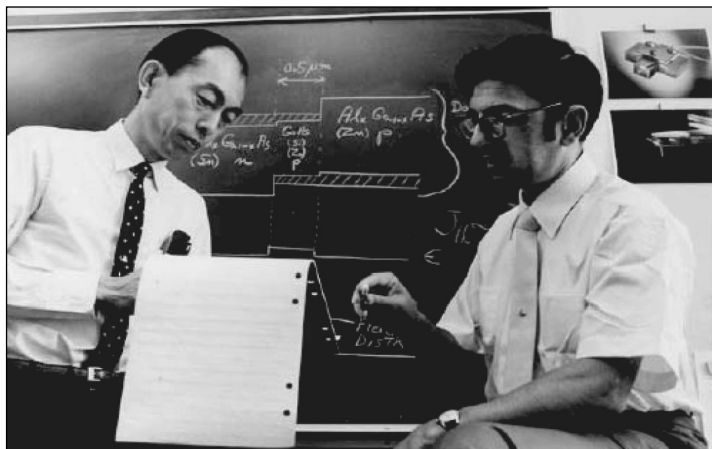
Фиг. 4 Схема на първия в света полупроводников хетеролазер, създаден от екипа на Ж. И. Алфьоров, работещ при стайна температура (края на 1968 г. – Лаборатория на Физико-техническия институт „А. Ф. Йоффе”)

Докладът на Ж. И. Алфьоров върху негови изследвания на Международната конференция по луминесценция в САЩ през август 1969 г. предизвиква огромен интерес сред неговите американски колеги

И отново започва негласно съревнование за създаване на полупроводников лазер, работещ в непрекъснат режим при стайна температура, между научните колективи от лабораториите на Bell Telephone, IBM и RCA. Почти едновременно през 1970 г. до реализацията му достигат два екипа – този на Ж. И. Алфьоров (Alferov et al., 1971) и групата на М. Паниш от Bell Telephon (Hayashi, 1970) (Фиг.5). Резултатите са впечатляващи – получени са лазери, работещи в непрекъснат режим, осигуряващи висока изходна мощност, при това с плътност на протичащия ток с два порядъка по-малка от този при хомогенната структура (500–1000 А/см²). Открива се и непосредствената възможност за модулиране на изходящото лазерно лъчение, при това с честота от стотици до хиляди MHz.

Така полупроводниковите лазери реално добиват практическо значение едва след след 1963 г., когато Жорес Алфьоров и Р. И. Казаринов в СССР (Alferov, 1963) и Херберт Кьолер в САЩ (Kroemer, 1963) предлагат и реализират използването на хетероструктури. За тези свои уникални изследвания Алфьоров и Кьолер са удостоени с Нобелова награда по физика за 2000 г.

За своите изследвания в областта на хетеропреходите и приборите на тяхна основа Ж. И. Алфьоров, В. М. Андреев, Д. З. Гарбузов, В. И. Корольков, Д. Н. Третяков, В. И. Швейкин са удостоени през 1972 г. с Ленинска награда.



Фиг. 5 Izuo Hayashi вляво и Morton Panish в Bell Laboratorie, разработили през 1970 г. полупроводников лазер, работещ при стайна температура в непрекъснат режим

В резултат на усилията на технолози и инженери през 1975 г. на пазара се появява и първият промишлен полупроводников лазер, работещ при стайна температура, а само след година е построена и първата оптична линия в град Аталанта (САЩ). При това срокът на живот на лазерите е увеличен на 100 000 часа (~10 години), а през 1977 г. работният им ресурс вече е нараснал на 1 000 000 часа (~100 години).

Periodensystem mit relevanten Elementen

III-V Verbindungshalbleiter																																	
Dotierstoffe																																	
1 H																	2 He																
3 Li	4 Be															10 Ne																	
5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe	55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb
87 Fr	88 Ra	89-102 ***	103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og	119 Uut	120 Uuq	121 Uub	122 Uut	123 Uuq	124 Uub	125 Uut	126 Uuq	127 Uub	128 Uut	129 Uuq	130 Uub	131 Uut	132 Uuq	

* Lanthanide series

La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

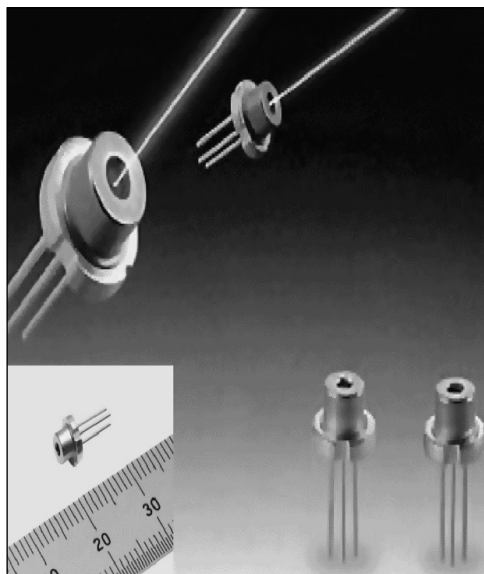
** Actinide series

Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No
----	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

Фиг.6. Периодичната система и съответните елементи на бинарни съединения от типа A^3B^5 и техните примеси, използвани за полупроводникови лазери

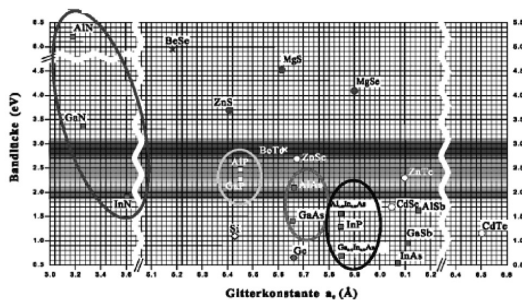
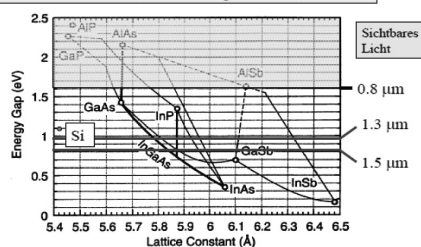
Значително се разширява и базата на използваните материали за полупроводникови лазери (Фиг.6), това са предимно бинарни съединения от типа A^3B^5 , A^2B^6 , A^4B^6 и техни твърди разтвори. Всички те са полупроводници с преки зонни преходи, в които съществува най-висока вероятност за междузонна излъчвателна рекомбинация.

Днес, сравнявайки полупроводниковите лазери с другите типове лазери, може накратко да се отбележат следните техни особености: (а) квантовите излъчвателни преходи се реализират на база зонната структура на полупроводниковия материал от малка активна област $\sim 1 \mu m$; (б) лазерното лъчение възниква непосредствено под действие на протичащия електричен ток при свързване на диода в права посока; (в) притежават много малки геометрични размери (дължина $\sim 0,1 mm$) (Фиг. 7); (г) разходимостта на изходящото лазерно лъчение е значително по-голяма от тази на твърдотелните лазери; (д) пространствените и спектралните характеристики на лъчението от полупроводниковия лазер са в пряка зависимост от свойствата на материала (структурата на забранената зона и коефициента на пречупване), от който е направен р-п преходът (Фиг.8); (е) възможност за модулация на изходящото лазерно лъчение посредством модулация на тока; (ж) висок КПД и широка област на приложение в науката, техниката и бита (виж. Табл.1); (з) сравнително ниска себестойност.



Фиг.7. Общ вид на полупроводников лазер (Щербаков, 2011)

Bandlücke und Gitterkonstante ausgewählter Halbleiter



Фиг.8. Влияние на структурата на забранената зона на материалите, използвани за полупроводникови лазери, върху спектралните им характеристики

Таблица 1. Дължините на вълните на най-използваните полупроводникови лазери и тяхната област на приложение

λ , nm	приложения на комерсиални полупроводникови лазери
405	на базата на InGaN (индийгалиев нитрид) – излъчва в синьо-виолетовата част на спектъра . Използва се в Blu-ray-Disc и HD-DVD устройства
445	използва се във видеопроекторите като светлинни източници
515	на базата на полупроводниковия материал InGaN (индийгалиев нитрид). На ниво лабораторни изследвания
531	на базата на полупроводниковия материал InGaN (индийгалиев нитрид). На ниво лабораторни изследвания
635	лазерна показалка (червен цвят) с много добро качество. Използва се и за оптични измервания в лидарите
650	използва се в DVD устройства, както и за показалка
670	използва се за евтини и с ниско качество червени лазерни показалки, както и за четене на баркодове.
760	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на кислород
780	използва се в CD, лазерни принтери, лазерни бариери
808	за напompване на Nd:YAG лазери, зелените лазерни показалки и диодните лазери
980	за напompване в Nd:YAG лазери
1064	намира приложение в мрежи за пренасяне на данни по стъкловолокно
1310	намира приложение в мрежи за пренасяне на данни по стъкловолокно
1480	за напompване в Nd:YAG лазери
1512	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на амоняк

1550	намира приложение в мрежи за пренасяне на данни по стъкловолокно
1625	намира приложение в мрежи за пренасяне на данни по стъкловолокно. В Wavelength Division Multiplex (WDM) обикновено се използва за канална връзка за управление на мрежата.
1654	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на метан
1877	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на водни пари
2004	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на въглероден диоксид
2330	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на въглероден оксид
2680	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на въглероден диоксид
3030	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на етан
3330	използва се в газовата спектроскопия: за регистриране наличието на метан

Заклучение

През XX век са реализирани различни начини за създаване на инверсна населеност в полупроводниковите материали – чрез инжекционно, електронно възбуждане (бомбардиране с електрони) и оптическо напompване с лавинен пробив. Както се вижда от изложението, цялата история на полупроводниковия лазер е блестящ пример за това, как плеяда учени от цял свят през тези 50 години дават своя съществен принос, за да се реализира този впечатляващ прогрес, на който сме свидетели днес, и да се изградят предпоставките за нашето бъдещо развитие не само в областта на науката и техниката, но и на общество ни като цяло.

Днес, в началото на XXI век, нивото на полупроводниковата технология е такова, че учените действително могат да „поставят” атом до атом, като създават принципно нови структури, и не само това, но и да променят техните свойства, както пожелаят. Възможно е да се изграждат системи, в които електроните са ограничени или в една равнина, или в едно измерение, т.е. в нишки, или се явяват нула-размерни структури – така наречените квантови точки с намалена размерност на електронния газ.

Като заключение бих искал да цитирам само един малък абзац от статия на лауреата на Нобелова награда Ж. Алфьоров (Alferov, 2001), в която той ясно очертава насоките на бъдещото развитие: „...що се отнася до квантово-размерните обекти на физиката на кондензираното състояние, квантовите нишки и квантовите точки, то тук съвсем определено може да се очакват промени в нашите фундаментални физични представи, а следователно и нов „взрив” в науката.”

БЕЛЕЖКИ

1. http://edisontechcenter.org/hall_r.html

ЛИТЕРАТУРА

- Попов Ю. М., (2011). История создания инжекционного лазера. *Успехи физ. наук*, 181, 102–107.
- Щербаков, И. А. (2011). К истории создания лазера. *Успехи физ. наук*, 181, 71–78.
- Alferov, Z.I. (2001). The double heterostructure: concept and its applications in physics, electronics and technology. *Rev. Modern Phys.*, 73, 767–782.
- Alferov Z.I., Andreev, V.M., Garbuzov, D.Z., Zhilyaev, Y.V., Morozov, E.P., Portnoi, E.L. & Trofim, V.G. (1971). Investigation of the influence of the AlAs - GaAs heterostructure parameters on the laser threshold current and the realisation of continuous emission at room temperature, *Sov. Phys. Semicon.*, 4, 1573–1575.
- Alferov, Z.I. & Kazarinov, R.F. (1963). Semiconductor laser with electric pumping. *USSR patent 181737* (application 950840; 30 March 1963).
- Basov, N.G, Krokhin O.N. & Popov Y.M. (1961). Production of negative-temperature states in p-n junctions of degenerate semiconductors. *Sov. Phys. JETP*, 13, 1320–1321.
- Basov N.G, Vul B.M. & Popov Y.M. (1960). Quantum-mechanical semiconductor generators and amplifiers of electromagnetic oscillations. *Sov. Phys. JETP*, 10, 416–417.
- Hall, R.N., Fenner, G.E., Kingsley, J.D., Soltys, T.J. & Carlson, R. O. (1962). Coherent light emission from GaAs junctions. *Phys. Rev. Lett.* 9, 366–369.
- Hayashi, I., Panish, M.B., Foy, P.W. & Sumski, S. (1970). Junction lasers which operate continuously at room temperature, *Appl. Phys. Lett.*, 17, 109–111.
- Holonyak, Jr., N. & Bevacqua, S.F. (1962). Coherent (visible) light emission from Ga ($As_{1-x}P_x$) junctions. *Appl. Phys. Lett.* 1, 82–83.
- Kroemer, H. (1963). A proposed class of heterojunction injection lasers. *Proc. IEEE*, 51, 1782–1783.
- Maiman, T.H., (1960). Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, 187, 493–494.
- Nasledov, D.N., Rogachev, A.A., Ryvkin, S.M. & Tsarenkov, B.V. (1962). Recombination radiation of gallium arsenide. *Sov. Phys. Solid State*, 4, 782–784.
- Nathan, M., Dumke, W.P., Burns, G., Dill, F.H. Jr. & Lasher, G. (1962). Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions. *Appl. Phys. Lett.*, 1(3), 62–64.
- Neumann, J. (1987). Notes on the photon-disequilibrium-amplification scheme (JvN), September 16, 1953. *IEEEJ Quantum Electronics*, 23, 659–673.
- Rediker, R.H. (1989). Early work at Lincoln laboratory on GaAs Semiconductor Devices. *Linkoln Laboratory J.*, 2(1), 3–4.

THE 50TH ANNIVERSARY OF SEMICONDUCTOR LASER

Abstract. Pioneering developments which are related to the invention of laser, including semiconductor laser, 50 years ago are amongst of the most important scientific achievements of the twentieth century. They still have a significant influence on the technical progress of our society. The essential role of whole host of American researchers (Hall, Holonyak, Nathan, Rediker, Kroemer, Hayashi, etc.) and Russian scientists (Basov, Nasledov, Rivkin, Alferov, Popov, etc.) in the development of the semiconductor and laser engineering has been revealed. Retrospection is made to the struggle of ideas and the stages through which various teams of outstanding scientists from leading research laboratories in the USA (General Electric, Lincoln Laboratory, Bell Telephone, IBM) and Russia (Ioffe Physical Technical Institute, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences) had to pass through. Evidence of the importance of these fundamental inventions is found in the fact that only 50 years have passed since the discovery of laser and so far ten scholars have been awarded the Nobel Prize for research in the development of principles and applications of laser.

✉ **Dr. Lyubomir Lazov, Associate Professor**

Technical University in Gabrovo

4, Hadji Dimitar Str.

5300 Gabrovo, BULGARIA

E-mail: llazov@abv.bg