

良好的进展。我们造就了新一代的晶体学家，更新了晶体学的研究和教学设备，并提高了晶体学队伍的水平。

我认为，这种进步的原因可归结为下列因素：第一，1978年以来的开放政策推动了我国晶体学的国际交流和合作；其次，1980年通过了《中华人民共和国学位条例》，并公布了有关的《暂行实施办法》，这对我国成批培养包括晶体学在内的各个学科的高级人才起了一个规范化的作用；第三，晶体学作为一门科学，在当今化学、物理、生物以及高技术的发展中显得越来越

重要；最后，我还应该强调一下那些与晶体学有关的国家重点实验室所起的骨干作用。

在这个讲话中，我不评议我国当前晶体学研究的众多成果，因为这既无必要，亦无可能。我请大家参考这次大会中的报告和论文摘要等第一手资料。

在不久的将来，为了满足社会和经济发展的需求，我国将培养和造就一个规模较大和很有才能的晶体学队伍。

我祝愿你们身体健康和旅行顺适。谢谢。

γ 激光概念研究进展¹⁾

霍 裕 昆

(复旦大学物理二系, 上海 200433)

γ 激光的研究目前仍处于论证物理可行性的概念探索阶段。这是一项有重大应用前景而难度又极大的综合性物理-工程课题。简要介绍了这一研究领域的现状、主要困难及今后可能的发展趋势。

关键词 长寿命同质异能素, 强激光辐射, 激光物理, γ 激光器

Abstract

The study of gamma-ray lasers is presently being in a stage of conceptual design to explore their physical feasibility. This study certainly may lead not only to a variety of novel uses of this kind of lasers, but also to revolutionary impacts on technological and scientific development. Meanwhile, this study is a comprehensive and interdisciplinary research subject in physics-engineering field, which may involve great difficulties in studies. This article makes a survey of the present status and describes the main problems and possible development of this study.

Key words long-lived isomer, intense laser radiation, laser physics, γ-laser

一、金茨堡 (V. L. Ginzburg) 的研究课题单

金茨堡是原苏联的一位著名物理学家，他有一项颇受人们重视的活动，那就是每隔几年提出一些被认为是当时最重要而又有兴趣的物
物理

理学和天文学研究的前沿课题。美国的权威物理杂志《今日物理》(“*Physics Today*”) 1990年刊登了他新近提出的24个课题单^[1]。每一个课题都覆盖了一个很大的研究领域。例如第一项是受控热核聚变，第24项是中微子天体物

1) 国家自然科学基金资助项目。

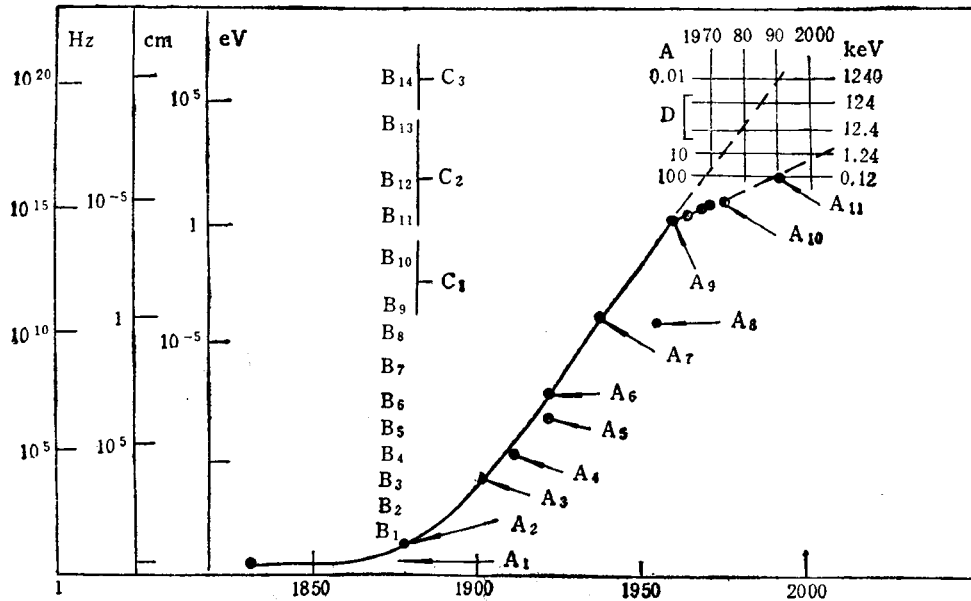


图1 相干电磁辐射源发展的历史^[2]

(A₁ 为早期的交流发电机, A₂ 为电动机, A₃ 为弧式电信发射机, A₄ 为机电转换器件, A₅ 为真空管器件, A₆ 为三极管器件, A₇ 为磁控管器件, A₈ 为微波器件, A₉ 为红宝石激光, A₁₀ 为紫外激光, A₁₁ 为X激光; B₁ 为动力电源, B₂ 为电话, B₃—B₄ 为长波无线电, B₅—B₆ 为短波无线电, B₇ 为电视, B₈ 为雷达, B₉ 为微波, B₁₀ 为红外线, B₁₁ 为可见光, B₁₂ 为紫外光, B₁₃ 为X射线, B₁₄ 为γ射线; C₁ 为分子谱, C₂ 为原子谱, C₃ 为核谱, D 为穆斯堡尔效应)

理。引人注目的是其中第九项为γ激光与强激光器。

γ激光(glaser 是 gamma-laser 的缩写)是指波长比X射线更短、光子能量在5—1000keV范围内的相干电磁辐射。其上限取为1 MeV,是因为能量再高的光子在介质中可以产生正负电子对,其作用截面随光子能量升高而很快增加,不可能实现相干光的放大。

从60年代初红宝石激光器问世以来,科学家们就致力于发展短波长激光器。图1示出了19世纪中叶以后相干电磁辐射源发展的历史。每一种器件覆盖一定的频率范围。圆点表示该种器件最初出现的年代及当时达到的频率大小。图中的实线是各种器件发展曲线的包络,它显示如下两个有趣的特点:(1)在1900—1960年期间,大约每隔五年人类能达到的相干辐射源的频率就提高近一个数量级;(2)到80年代末,虽然制成了光子能量约为100eV的X激光,但是整个发展已呈现“饱和”趋势。

与可见光及X射线相比,γ射线的特点是波长短,贯穿能力强,电离本领高,可以与内壳层电子甚至原子核作用。一旦这些特点与激光的相干性、空间定向性、单色性等特性结合起来,即形成所谓的γ激光,它肯定会对科学技术的发展带来巨大的推动作用,并在精密测量、通信、定向武器、诊断治疗、穆斯堡尔谱学、原子线度的全息照像等领域有重大的多方面的应用前景。正如在当初发明激光器时人们不可能预想到激光后来能在惯性约束聚变和医疗手术等方面获得重要应用一样,γ激光更重要的应用还要等到该器件建成后人们再去开发。

二、发展γ激光的三种途径

原则上有三种可能发展γ激光的途径^[2,3]。

1. 基于束缚电子的跃迁

由于中重元素内壳层电子的束缚能可以达到数十keV,而目前X激光仅达到百电子伏量

级,沿此途径向短波长发展似乎还大有潜力.这一途径的主要困难如下.由于内壳层电子态的寿命非常短,通常在 10^{-12} — 10^{-15} s 量级,因此为了对一对特定能级达到足够数量的粒子数反转,所需的泵浦功率将非常高,致使整个介质变成高温等离子体.这时不仅电子-离子复合截面小,而且谱线的多普勒增宽以及大大增加的光子散射过程都严重地阻碍实现光的放大.

2. 由自由电子激光向 γ 波段延伸

自由电子激光是一种非束缚电子的受激韧致辐射过程,也可称为相干的逆康普顿散射.通常的自由电子激光器依靠高能电子束通过空间周期变化的磁场作有规律的横向扭摆运动,而发生受激发射.它不仅具有高功率、高效率的特点,而且可以通过调整电子束能量或改变交变磁场的周期 λ_0 来连续调节输出激光的波长,原则上可以延伸到 γ 波段,但所要求的电子束能量极高,或 λ_0 太小,很难具体实现.例如,为了得到光子能量为 10keV 的相干辐射输出,如果入射电子束能量为 80MeV,磁场强度为数千高斯,则所需的 $\lambda_0 = 5\mu\text{m}$. 一个可能的解决途径是在与电子束运动相反的方向入射一强可见光激光束,用以代替扭摆场的作用.估算表明^[4], 80 MeV 的电子束在波长为 $10.6\mu\text{m}$ 的 CO_2 激光束场中,对应的逆康普顿散射光子能量为 10keV.当然,这一方案还有许多问题需要深入研究.

3. 核跃迁

与原子相比,原子核有一些特性适于作 γ 激光的工作物质.(1) 离散的核电磁跃迁谱线覆盖很大的能量范围,低至百电子伏,高达数兆电子伏.(2) 原子核有许多寿命比 10^{-9} s 长的激发态,称为同质异能态,它们的寿命 τ 覆盖范围极宽,可分为三类:短寿命(亦称穆斯堡尔范围) $\tau = 10^{-9}$ — 10^{-4} s;中等寿命 $\tau = 10^{-4}$ —1s;长寿命 $\tau = 1\text{s}$ 以上,最长的可达数年.同质异能态的存在为核 γ 激光器的发展提供了多种可能的途径.例如从泵浦的角度,用长寿命同质异能态作激光上能级是最理想的,这时虽然

激发能量密度很高,但所需的泵浦功率并不高.对于寿命在数分钟以上的同质异能态,甚至可以采用先激发后化学提纯的办法来制备活化的同质异能素物质.(3) 核可以采用多种方式激发,例如中子、带电粒子、特征 X 射线、韧致辐射、同步辐射和 γ 射线(含穆斯堡尔辐射)等.特别是核有多种放能反应如 (n, γ) 反应等,对泵浦特别有利.(4) 可以应用穆斯堡尔效应 (ME) 实现无反冲的核 γ 发射.利用 ME 发射作 γ 激光的主要优点之一是可以极大地抑制谱线的多普勒增宽,增加光的放大倍数.这时作为工作物质的同质异能素是镶嵌在固体载体中,而且载体的温度远低于其德拜温度.有人还建议用波曼 (Borrmann) 效应 (BE) 来增加光的增益,即把同质异能素嵌在单晶的格点上,在沿着晶面的布拉格 (Bragg) 方向上,由于格点正好处于电场驻波的节点,从而大大地降低原子对光束的电偶极散射(但不影响核的磁偶极或电四极受激发射),提高了光束的增益.

三、发展核 γ 激光的主要困难

就在第一台红宝石激光器建成后不久,科学家们就开始了核 γ 激光器的研究.20 多年来,提出了许多方案,但至今没有一个方案令人信服是可行的.所碰到的最主要困难是如何实现泵浦以得到足够数量的粒子数反转而又保持活化的介质有放大功能.下面我们较详细地分析这一问题.

光放大起码要求受激增益大于光束在介质中的损耗,即

$$n^* \sigma_{it} > n_0 \sigma_m, \quad (1)$$

式中 $n^* = n_B - (g_B/g_C)n_C$ 是粒子数反转密度,下标 B 与 C 分别代表激光上、下能级, g 是能级的统计权重因子, σ_{it} 是受激发射截面(也就是共振吸收截面), n_0 是介质的总原子密度, σ_m 是散射截面或称移去截面,反映了一定模式的光束在介质中损耗的大小.光的共振吸收截面是^[5]

$$\sigma_{st} = \frac{\lambda^2}{8\pi} \frac{\Gamma_\gamma \Gamma}{(E_\gamma - E_{BC})^2 + \Gamma^2/4} \frac{\lambda^2 F_\gamma}{2\pi F}, \quad (2)$$

式中 λ 是光的波长, Γ_γ 是能级 B 与 C 之间自发跃迁的分宽度, Γ 是两能级的总宽度. 光束在介质中损耗的主要机制是光电吸收、康普顿散射和逆韧致辐射. 由(2)式得到

$$\frac{\sigma_{st}}{\sigma_m} = \frac{(\lambda^2/2\pi) \Gamma_\gamma}{\sigma_m \Gamma}. \quad (3)$$

对于中重元素, $(\lambda^2/2\pi)/\sigma_m \sim 10^{3[2]}$. 如果要求 $n^*/n_0 \sim 10^{-3}$, 则由(1)式得到光束放大条件为 Γ_γ 与 Γ 同一数量级. 如果下能级不衰变, Γ 即上能级的总宽度, 它包括以下一些因子:

$$\Gamma = \Gamma_{in} + \Gamma_d + \Gamma_{ih}. \quad (4)$$

Γ_{in} 称为能级的固有宽度, 当略去内变换及其他 γ 衰变道的贡献时, $\Gamma_{in} = \Gamma_\gamma$, 由测不准关系知道, 能级的本征宽度(以下即指 Γ_γ) 与其寿命 τ 存在如下关系:

$$\Gamma_\gamma \tau \sim \hbar = 4.15 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}, \quad (5)$$

\hbar 是普朗克常数, 因此同质异能态的 Γ_γ 是非常小的. 例如长寿命同质异能态, $\tau > 1\text{s}$, 则 $\Gamma_\gamma < 10^{-15} \text{eV}$; 短寿命同质异能态时, $\tau \sim 10^{-4} - 10^{-9} \text{s}$, 则 $\Gamma_\gamma \sim 10^{-6} - 10^{-11} \text{eV}$:

Γ_d 是能级的多普勒增宽, 来源于发光体(核)的热运动所引起的光频率的变化. 如果介质是气体, 则有

$$\Gamma_d(\text{eV}) = 7.16 \times 10^{-7} E_\gamma(\text{eV}) \left(\frac{T}{M}\right)^{1/2}, \quad (6)$$

式中 T 是介质的绝对温度, M 是原子量数. 由于 Γ_d 正比于光子能量 E_γ , 因此对于 γ 激光, 多普勒展宽变得十分重要. 我们作一量级估算: 取 $E_\gamma = 10 \text{keV}$, $M = 100$, $T = 273 \text{K}$ (室温), 得到 $\Gamma_d \sim 0.01 \text{eV}$, 它远大于同质异能态的 Γ_γ , 即处于气体状态的同质异能素在室温下无法实现光放大. 为此, 必须把活化的同质异能素镶嵌在固体当中, 应用 ME 或 BE 发射来抑制多普勒增宽.

(4)式中第三项 Γ_{ih} 是能级的非均匀展宽,

它的物理机制非常复杂. 重力(引力红移)、核的电四极矩与固体内无规电场梯度的作用、混杂的核磁矩间的相互作用、核与非均匀分布的内层电子(内壳层空穴、杂质和晶格缺陷引起)相互作用都能引起能级的非均匀展宽. 很难定量地估算上述每种机制的单独效应. 从穆斯堡尔谱的测量可以得到固体中核能级非均匀展宽的下限至少是 10^{-10}eV . 因此对于寿命大于 10^{-4}s 的同质异能态, 即令用 ME 发射抑制其多普勒增宽, 由于 $\Gamma_\gamma \ll \Gamma_{ih}$, 仍无法得到光放大. 曾经提出了各种建议, 以期大幅度减小能级的非均匀展宽, 但都不成功.

从泵浦的角度, 由于核的线度较原子小 4—5 个数量级, 电磁多极矩也相应的小, 因此核虽然有多种的激发方式, 但作用截面都很小. 换言之, 即泵浦能量的有效利用率很低. 因此, 为了激发核的短寿命态并达到一定数量的粒子数反转是很困难的, 所需的泵浦功率极高, 将破坏 ME 和 BE 效应所要求的固体介质结构, 甚至把介质变成高温等离子体, 这时能级的多普勒增宽和大大增加的光散射(由于自由电子数目增加)都将破坏光放大条件.

总之, 对于寿命比 10^{-4}s 长的同质异能态, 除非找到有效地减小能级非均匀展宽的方法, 否则, 它无法充当激光上能级, 实现光放大. 对于 $\tau = 10^{-4} - 10^{-9} \text{s}$ 的能级, 可以用 ME 和 BE 效应来抑制多普勒增宽并减小散射损耗, 实现光放大. 但问题是如何找到有效的泵浦办法, 即既能建立粒子数反转, 又不破坏 ME 和 BE 结构. 对于寿命更短的能级, 泵浦问题更难解决.

在通常的光学激光器中, 采用由两面反射镜组成的光学共振腔使受激辐射光在腔内多次通过放大介质不断放大, 并起限制激光振荡模式的作用. 对于超短波长的 γ 光, 至今还没有发现合适的物质可以充当其反射镜, 只好要求介质有较高的放大增益, 使辐射光单次通过放大介质并得到足够强的输出, 即所谓的超辐射. 这是一种相干的自发辐射或自发辐射诱发的受激辐射过程.

四、两步泵浦的核 γ 激光方案

为了克服上述的泵浦与放大的困难,近年来人们集中讨论了一种两步泵浦的核 γ 激光方案^[5],其要点如图 2 所示.设某核素存在一对能量非常靠近但寿命相差甚大的同质异能态(图 2 中 A 表示长寿命态, B 表示短寿命态).首先制备由长寿命同质异能素构成的活化介质,再突然将其激发到短寿命态上,并在后者建立粒子数反转,从而在后者建立粒子数反转,从而实现 γ 激光.这一方案的特点是把长寿命态 A 当作储备能级,因此需要将长寿命态 A 上的粒子快速地泵浦到态 B 上,态 B 与态 A 的能量差为 E_{AB} , E_{AB} 远比态 B 的激发能 E_B 要小,因而易于实现泵浦.这一方案可以归纳为以下四个研究课题:

(1) 寻找具有图 2 所示能级结构的核素.美国的 Arthur 等人^[6]检索了现有的两大核结构数据库(ENSDF 含 48000 条能级数据和 CDRL 82 含 41000 条能级数据).他们一共找到七个例子,其能级间距小于 1keV,且其中有一条能级的寿命大于 5s.图 3 给出其中的四个例子.人们还在讨论如何从实验与理论两方面

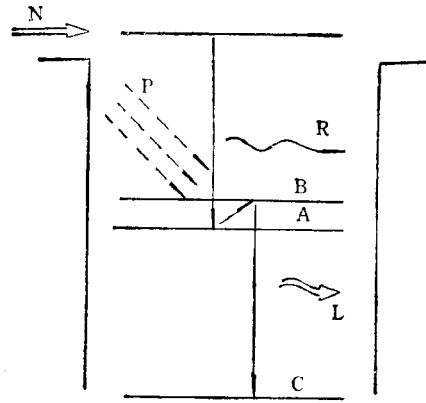


图 2 两步泵浦的 γ 激光示意图

[A 为长寿命同质异能态; B 为短寿命态(激光上能级); C 为激光下能级; N 为中子束; P 为辐照泵浦; R 为俘获 γ 辐射; L 为相干 γ 辐射]

同时努力来寻找更理想的核素.

(2) 制备具有 ME 和 BE 辐射的长寿命同质异能素.这一问题目前一般认为原则上有可能利用现有的技术来解决,即用 (n, γ) 反应制造长寿命同质异能素,再用电化学或光化学的方法将其分离、提纯,并镶嵌到对辐射光透明的 ME 和 BE 载体中去.

(3) 寻找泵浦方案,能快速地将核素从长寿命态激发到短寿命态上而又不破坏介质的

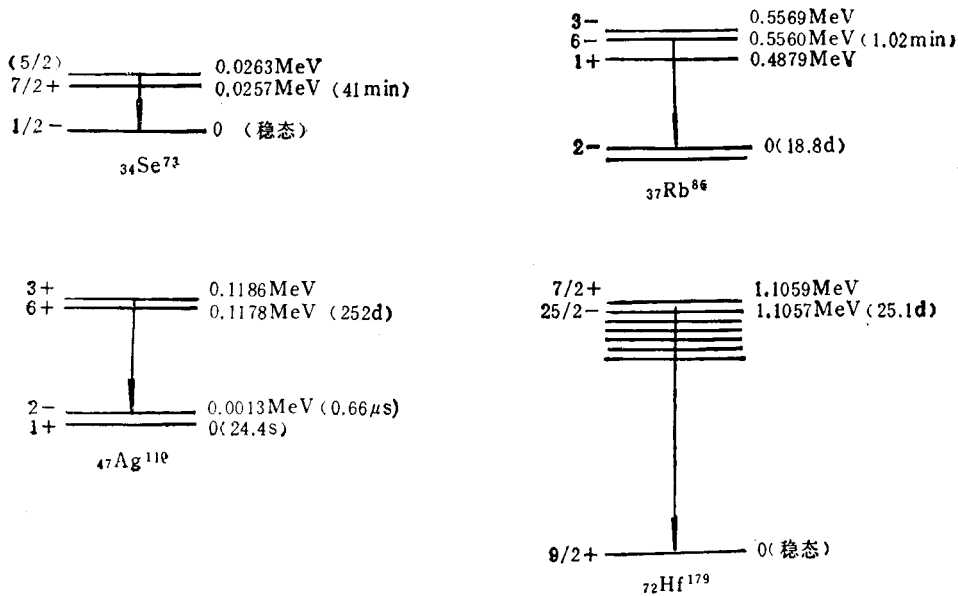


图 3 核素能级结构^[6]

(图中所示核素都有一对能量间距小于 1keV 的能级,且其中有一能级为寿命大于 5s 的同质异能态, d 表示天数)

ME 和 BE 结构。虽然这时所需要泵浦的能量 E_{AB} 已大大小于直接泵浦所需要的能量 E_B , 但这仍然是一个十分棘手的问题。主要的困难是原子核的各种直接泵浦作用截面都很小(光的共振吸收截面例外, 见(2)式, 但这在实践中很难实现)。人们目前还在探讨以电子为中间媒质间接地激发核的可能性^[7,8], 其物理机制如下: 由于原子电子有远比核大的电磁多极矩, 因而能够有效地吸收外电磁辐射场的能量, 引起原子电离, 甚至引起电子加速, 再通过电子跃迁或库仑激发等方式激发核。

(4) 在没有反射镜的情况下, 实现相干的 γ 光辐射。初步的估算表明, 当反转数密度足够高时, 可以通过超辐射机制实现。

五、展 望

对 γ 激光的研究目前仍处于论证其物理可行性的概念研究阶段。这是一项难度极大的综合性物理-工程课题, 涉及到很多学科领域, 如核谱学、激光物理、光谱学、固体物理、穆斯堡尔谱学、化学、中子物理等。有一种值得商榷的观点认为 γ 激光是 X 激光的扩展与延伸, 应当等到 X 激光的研究更加成熟后再开展这一项研究。由图 1 可以看到, 在向短波长激光器发展的进程中, 现有的建立在束缚电子跃迁基础上的激光器的发展已逐渐进入“饱和”阶段。 γ 波段的相干光要依靠新概念和新类型的器件来实现。应当及早开展这方面的探索研究。

经过 20 多年的努力, 科学家们对基于同质

(上接第 112 页)

料的组成, 而择优溅射可通过调整材料组成比例来解决; 几乎没有温度分布不均匀的影响, 制备条件比较容易控制, 重复性较好; 对真空室的热影响小, 减少了环境(真空室放气)对制备样品的影响。

异能态的核 γ 激光所碰到的主要困难及其物理实质已经弄得比较清楚了。目前的研究大多集中在应用 ME 和 BE 发射的两步泵浦方案上。主要的困难是寻找具有图 2 所示的特殊能级结构的核素, 以及如何实现泵浦而又不破坏介质的 ME 和 BE 结构。

人们还在积极地探索各种新方案, 如以电磁波为扭摆场的自由电子激光, 基于正负电子对湮没的相干 γ 光发射, 以及各种不需要反转的 γ 激光方案^[9,10]。在科学发展的历史上常有这样的例子, 沿着原来的思路已是“山穷水尽疑无路”, 通过新思想、新概念的探索而出现了“柳暗花明又一村”的新局面。 γ 激光的研究很可能正处于这一转折关头。

作者感谢冯量同志在准备本文稿件和作图中提供的有益的协助。

- [1] V. L. Ginzburg, *Phys. Today*, **43-5**(1990), 13.
- [2] G. C. Baldwin, J. C. Solem and V. I. Goldanskii, *Rev. of Modern Phys.*, **53**(1981), 687.
- [3] G. C. Baldwin, *Phys. Reports*, **87-1**(1982), 1.
- [4] Liang Feng and Yu-Kun Ho, *Phys. Rev. E*, **47**(1993), R2277.
- [5] Yu-Kun Ho and Zheng-Ying Pan, *Nucl. Phys.*, **A 486**(1988), 271.
- [6] E. D. Arthur, D.G. Madland and D.C. George, *SPIE*, **575**(1988), 117.
- [7] F. X. Hartmann, D. W. Noid and Y.Y. Sharon, *Phys. Rev. A*, **44**(1991), 3201.
- [8] Yu-Kun Ho, Bao-Hui Zhang, *Phys. Rev.*, **C, 44**(1991), 1910.
- [9] M. O. Scully, *Phys. Reports*, **219-3**(1992), 191.
- [10] D. Marcuse, *Proc. IEEE*, **51**(1963), 849.

- [1] Zhu, X et al., *Phys. Rev. B*, **35**(1987), 9085.
- [2] H. Gleiter, and Marguard, P., *Z. Metallk.*, **75**(1984), 263.
- [3] H. Gleiter, *Progress in Materials Science*, **33**(1989), 223.