

文章编号: 1000-7032(2018)05-0661-07

具有 e 指数内建电场的透射式 GaAs 光电阴极响应特性的理论分析

蔡志鹏^{*}, 姚军财, 黄文登, 何军锋

(陕西理工大学 物理与信息工程学院, 陕西 汉中 723001)

摘要: 设计了具有 e 指数内建电场的透射式 GaAs 负电子亲和势阴极, 利用数值计算方法研究了它的时间响应特性和量子效率特性。结果表明, 当吸收区厚度 $L \sim 0.2 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 时, 阴极的响应时间和量子效率均随 L 的增大而增大; 尤其当 $L \sim 1.1 \mu\text{m}$ 时响应时间达到 10 ps, 量子效率达到 12.5% ~ 20%, 迄今为止, 与其他 GaAs 光电阴极相比, 在相同光谱响应条件下, 该响应速度是最高的。另外, 在不同 L 下, 获得了平均时间衰减常数 τ' 的函数分布和能够获得最短响应时间的最优系数因子 β 分布, 为新型高速响应 GaAs 光电阴极的时间响应和量子效率优化提供了必要的理论基础和数据支持。

关键词: GaAs 光电阴极; e 指数内建电场; 最优系数因子; 时间响应

中图分类号: O462 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183905.0661

Theoretical Study of Response Characteristics of Transmission-mode GaAs Photocathodes with Exponential Inner Electric Field

CAI Zhi-peng^{*}, YAO Jun-cai, HUANG Wen-deng, HE Jun-feng

(School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi Sci-Tech University, Hanzhong 723001, China)

^{*} Corresponding Author, E-mail: caizp001@126.com

Abstract: A new-type transmission-mode NEA GaAs photocathode with the exponential built-in electric field was designed. The two important features of the new-type GaAs photocathode, the time response and the quantum yield, were theoretically studied by numerical methods. The simulation results show that the response time and the quantum yield of the new-type photocathode gradually increase with the widths of absorption layer when the widths are 0.2 – 1.5 μm . Especially, when the width is 1.1 μm , the time responses are 10 ps, and the quantum yield is 12.5% – 20%. So far, compare with previous GaAs photocathodes with other doping modes, this one has the shortest response time in the same condition of the spectral responses. Meanwhile, the two functions of the average decay time and optimal factor of the built-in electric field are obtained under different widths of absorption layers, the former is related to time responses, and under the latter condition the shortest response times are obtained. The above results provide the theoretical and data basis for the design to optimize new-type GaAs photocathodes with ultrafast response.

Key words: GaAs photocathode; exponential built-in electric field; optimal factor; time response

收稿日期: 2017-09-14; 修订日期: 2017-12-11

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划(16JK1132); 陕西理工大学科研基金(SLGQD14-07); 国家自然科学基金(61301237)资助项目

Supported by Scientific Research Program Funded by Shaanxi Provincial Education Department(16JK1132); Research Program Funded of Shaanxi Sci-Tech University(SLGQD14-07); National Natural Science Foundation of China(61301237)

1 引 言

GaAs 负电子亲和势光电阴极具有远优于多碱阴极和 Ag-O-Cs 阴极的优点,诸如量子效率高、暗电流小、电子出射的平均能量及能量角分布小、长波阈值大等,因此在微光夜视、光电倍增器、电子源等诸多领域具有广泛应用^[1-6]。但由于其响应时间过长,达到纳秒量级,因此影响了它在更高超快领域诸如高速摄影、高能物理、自由电子激光器(Free electron laser, FEL)等领域的进一步应用^[7-9]。由于在电子输运方向上附加电场,能够提高电子的输运速度,进而提高 GaAs 阴极的响应速度,因此蔡志鹏等^[10-11]基于郭里辉等^[12]提出的将外加电场引入阴极,以及邹继军等^[13]提出的指数掺杂方式将均匀电场引入阴极的方法,提出了一种具有超快响应的大梯度指数掺杂透射式 GaAs 光电阴极^[10-11],研究表明,在阴极的吸收层厚度达到约 0.9 μm 时,这种指数掺杂方式使得阴极的响应时间达到 10 ps,量子效率大于 10%,因此能够在保持较高量子效率下,极大地提高光电阴极的响应速度。信号光入射到透射式 GaAs 光电阴极时,吸收层中产生的光电子数目由体内到表面呈 e 指数逐渐减少。内建电场的高低对靠近表面一侧光电子的输运效率不大,而对靠近缓冲层的体内光电子输运效率影响较大。因此,内建电场的变化(即掺杂方式的不同)能够影响阴极的响应特性。对大梯度指数掺杂方式来说,虽然它能够极大地提高 GaAs 光电阴极的响应速度,但对阴极时间响应特性的提高来说,它并不是最优化的掺杂方式。为了获得更快的阴极响应速度,对阴极的掺杂方式进行进一步优化,设计阴极的内建电场由体内到表面依次降低,令光生电子的输运速度由体内到表面由快变慢,从而光电子在向阴极表面加速的同时,在垂直表面方向的一维空间上被进一步压缩而具有一定的空间会聚效应,因此可以使阴极的响应时间进一步缩短,响应速度进一步提高,从而达到优化提高阴极瞬态响应特性的目的。

本文基于透射式 GaAs 光电阴极的光吸收特点,通过新的梯度掺杂设计,在 GaAs 光电阴极内部形成由体内到表面 e 指数衰减的内建电场,同时基于变系数的光电子输运方程,系统研究了这种新的掺杂方式下阴极的响应特性——时间响应特性和量子效率特性,研究在何种参

数条件下,能够达到最优化的时间响应,并能保持较高的量子效率,为 GaAs 光电阴极在更高超快响应领域的应用,以及进一步拓展 GaAs 光电阴极在其他领域的应用提供必要的理论和数据支持。

2 具有 e 指数内建电场的 GaAs 光电阴极的能带结构

图 1 是具有 e 指数内建电场的 GaAs 光电阴极的能带结构示意图,其中 E_g 是 GaAs 的禁带宽度, E_c 、 E_v 分别为 GaAs 导带底能级和价带顶能级, E_F 为 Cs:O 激活后 GaAs 阴极的费米能级, E_0 是真空能级, Φ 是电子的逸出功函数, δ 是阴极表面处的能带弯曲量。

根据设计,这种新掺杂方式下的 GaAs 光电阴极设计结构由光吸收 I 区($x:0 \sim L$)和表面发射 II 区($x:L \sim L+d$)构成,如图 1 所示。其中 L 是吸收区宽度, d 是表面发射区宽度。

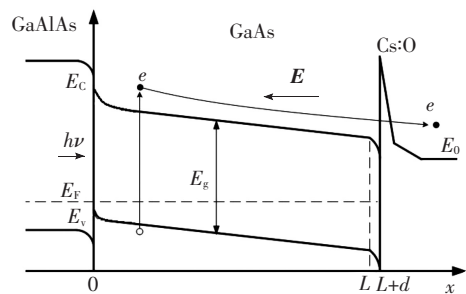


图 1 具有 e 指数内建电场的 GaAs 光电阴极的能带结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of band structure of GaAs photocathode with the exponential built-in electric field

(1) I 区

I 区的作用是产生光电子,并将光电子加速向表面输运。I 区内的电场强度设计

$$E = -A \exp(-\beta x), \quad (1)$$

其中, I 区 GaAs 吸收层为 p 型掺杂, β 是与掺杂函数相关的系数因子。界面处掺杂浓度设计为: GaAlAs/GaAs 边界处 $N(0) = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, I 区与 II 边界处 $N(L) = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 。

当不考虑 $L=0$ 附近重掺杂下的弱简并态时,则 GaAs 吸收层 I 区的电势分布

$$V(x) = -\int_0^x E dx = \frac{A}{\beta} [\exp(-\beta x) - 1], \quad (2)$$

由此可以得出 I 区内任一点的电势^[9,13]

$$V(x) = \frac{kT}{q} \ln \frac{N(0)}{N(x)}, \quad (3)$$

其中, $N(x)$ 是 I 区掺杂浓度分布函数, k 是玻尔兹曼常数, $T = 300 \text{ K}$, q 是单位电荷电量。

根据边界处掺杂浓度和式(2)、(3), 得出

$$A = \frac{kT}{q} \ln \frac{N(0)}{N(L)} \frac{\beta}{1 - \exp(-\beta L)}, \quad (4)$$

由式(1) ~ (4) 可得 I 区内的 p 型掺杂浓度分布函数

$$N(x) = N(0) \exp \left[\ln \frac{N(0)}{N(L)} \frac{\exp(-\beta x) - 1}{1 - \exp(-\beta L)} \right]. \quad (5)$$

(2) II 区

II 区是 p 型重掺杂薄层, 掺杂浓度 N_a 为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, 其作用是 Cs: O 激活后产生足够高的表面逸出几率。根据半导体理论^[9-10,14], 当 II 区的厚度 d 表示为式(6)时, 在 Cs: O 激活后, I/II 区边界处因掺杂浓度突变产生的电子势垒被消除。 d 的厚度设计如下:

$$d = \sqrt{\frac{E_g}{3} - \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{N(L)}}, \quad (6)$$

需要说明, 首先, 未 Cs: O 激活时, 在 I/II 区边界处, 由于 II 区的掺杂浓度大于临近 I 区, 因此会形成阻碍电子向表面渡越的、高度约 0.2 eV 的“电子势垒”^[10,13]; 其次, 在 Cs: O 激活后, 表面处形成一定宽度的能带弯曲区, 能带弯曲量比均匀掺杂 GaAs 光阴极减小 0.2 eV 但大于零, 因此当 II 区厚度 d 如式(6)设计时, I/II 区界面的“电子势垒”被消除; 最后, 根据文献计算^[10-11,14], 在该设计下的表面逸出几率 $P \sim 0.3$ 。另外, 在该设计条件下, 虽然阴极表面的负电子亲和势 (Negative electron affinity, NEA) 的绝对值较常规均匀掺杂阴极减少 0.2 eV, 而常规均匀阴极的 NEA 为 $-0.4 \sim -0.5 \text{ eV}$ ^[15-16], 因此本设计中的阴极的 NEA 达到 $-0.2 \sim -0.3 \text{ eV}$, 能够形成负电子亲和势表面。

在实际设计中 II 区 GaAs 的厚度略小于 d , 以保证 I/II 区边界处的“电子势垒”有效消除。其中, ϵ 是 GaAs 的介电常数。同时, 由于光在阴极内的渡越时间极短, 因此忽略光在阴极内的传播时间; 由于 $d \ll L$, 因此在讨论阴极的时间响应时, 不考虑光电子在 II 区内的渡越时间。

3 响应特性分析

对 GaAs 光电阴极的响应特性分析, 一般通

过求解光电子运输的一维连续性方程获得, 由于载流子浓度变化较大, 光电子的迁移率和寿命等系数均为变量, 因此一维连续性方程表述为^[10-11]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \Delta n(x, t) = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_n(x) \frac{\partial}{\partial x} \Delta n(x, t) - \mu_n(x) |E| \Delta n(x, t) \right] - \frac{1}{\tau_n(x)} \Delta n(x, t) + g(x, t), \quad (7)$$

其中, $D_n(x) = \frac{kT}{q} \mu_n(x)$, $\Delta n(x, t)$ 表示光电子(少子)浓度, $D_n(x)$, $\mu_n(x)$, $\tau_n(x)$ 分别为光电子的扩散系数、迁移率和寿命, $g(x, t)$ 是光生函数^[17]。下面将基于上述连续性方程, 讨论新掺杂方式下的透射式 GaAs 光电阴极时间响应和量子效率两个主要特性。

3.1 时间响应分析

在理想 δ 脉冲条件下, 初值条件表示为

$$g(x, 0) = \alpha I_0 (1 - R) \exp(-\alpha x), \quad (8)$$

其中 α 为 GaAs 的吸收系数, I_0 是入射光强。

根据文献[8-11]可知, 边界条件表示为

$$D_n(x) \frac{\partial}{\partial x} \Delta n(x, t) \Big|_{x=0} -$$

$$\mu_n(x) |E| \frac{\partial}{\partial x} \Delta n(0, t) = S \Delta n(0, t), \quad (9)$$

$$n(L, t) = n(L, t - dt) \exp(-dt/\tau'), \quad (10)$$

其中 τ' 表面处电子浓度的平均衰减常数, 如文献[10-11]所述, 发射向真空的光电子流表示为:

$$J(t) = -PD_n(x) \frac{\partial}{\partial x} \Delta n(x, t) \Big|_{x=L}, \quad (11)$$

其中 P 是阴极表面的电子逸出几率, 由于掺杂设计的 I 区和 II 区界面存在掺杂浓度突变, 因此这种阴极表面处的能带弯曲量小于常规阴极, 其电子的表面逸出几率将小于常规阴极, 根据文献[10-11, 14], 计算中选取合适的电子逸出几率值 $P = 0.3$ 。

由式(7) ~ (11), 采用后向差分法求得方程数值解, 并基于此来讨论新掺杂方式下透射式 GaAs 光电阴极的时间响应特性。

3.1.1 平均时间衰减常数 τ'

τ' 是为了解决 $x = L$ 界面处边界条件与初值条件的相互矛盾而引入的参数^[10], 它假定发射边界处的电子浓度与整个发射过程均有关, 是电子发射过程在电子发射边界的综合描述, 文献[10-11]表明, 该参数的引入能够有效解决边界条件的不足。同时, 该参数主要受阴极厚度 L 与入射

光子能量 E_{hv} 的影响,而 GaAs/GaAlAs 后界面复合速率 S 的影响可以忽略不计^[10],一般计算中,取 $S = 10^5$ cm/s,因此本文仅讨论吸收区厚度 L 与入射光子能量 E_{hv} 对它的影响。

图 2 给出 $S = 10^5$ cm/s 下,平均时间衰减常数 τ' 与阴极吸收区厚度 L 、入射光子能量 E_{hv} 之间的关系。由图 2 可知,平均时间衰减常数 τ' 受 L 影响最大, L 越大, τ' 越大,且基本呈线性增大;当 $L \leq 0.5$ μm 时, E_{hv} 越大, τ' 越小,但相差小于 0.1 ps;当 $L \geq 0.7$ μm 时, E_{hv} 的影响可以忽略不计。总之, L 对 τ' 的影响占主导地位。

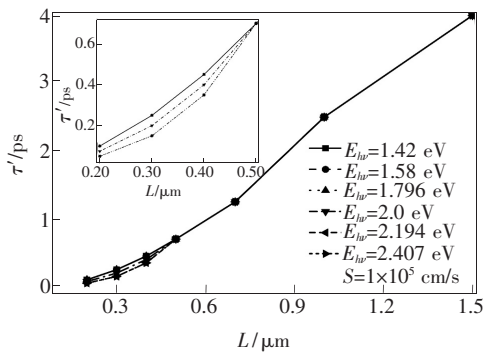


图 2 τ' 与 L 、 E_{hv} 的关系。

Fig. 2 Relationship of τ' and L , E_{hv} .

3.1.2 最优化系数因子 β 与 L 、 E_{hv} 的关系

系数因子 β 的大小决定了阴极内电场强度分布,从而影响光电子在阴极内的输运过程以及发射电子的时间响应分布。由图 3 可知,相同条件下,当系数因子 β 逐渐增大时,响应曲线的半峰宽 (Full width at half maximum, FWHM) 出现先减小后增大的现象,在 $\beta = 4$ 时,响应曲线的 FWHM 达到最小值。也就是说,在相同条件下,当选择适合

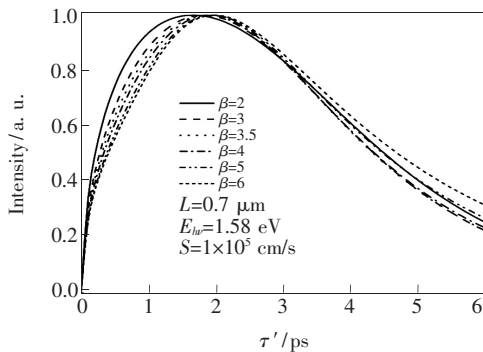


图 3 相同条件下,时间响应随系数因子 β 变化的关系曲线。

Fig. 3 Time response curves vary with the optimal factor in the same conditions

的系数因子 β 时,能够使阴极的响应时间最短 (即 FWHM 达到最小值),因此,当响应时间最短时所对应的 β 值,称为最优系数因子。基于不同 L 、不同 E_{hv} 下的 τ' 值,计算了不同 L 、不同 E_{hv} 下的最优系数因子 β ,如表 1 所示。

表 1 最优系数因子 β 与 L 、 E_{hv} 的关系

Tab. 1 Relationship of the optimal factor β and L , E_{hv}

β / $L/\mu\text{m}$	E_{hv}/eV 1.42	1.58	1.796	2.0	2.2	2.407
0.2	8	8	10	9	9	10
0.3	6	8	8	8	8	9
0.4	5	5	6	6	6	7
0.5	3.5	4	5	5	5	6
0.7	3.5	4	4	4	4	4
1.0	2.5	3	3	3	3	3
1.5	2	2	2	2	2	2

由表 1 可以看出,在 E_{hv} 相同条件下,最优 β 值变化规律一致:随着 L 增大,最优 β 值逐渐下降;同一 L 下,随着 E_{hv} 的增大,最优 β 值有所增加,且 L 越小,增大越明显,但增加幅度不大。当 $L \geq 1$ μm 时,最优 β 值基本不再随 E_{hv} 变化。

3.1.3 时间响应曲线

图 4 是在 $E_{hv} = 1.58$ eV 时,最优系数因子 β 条件下,不同 L 下时间响应曲线。图 4 表明,阴极的响应时间随 L 的增大而增大,当 $L = 1$ μm 时,阴极的响应时间达到 ~ 8 ps。在 L 相同的条件下,本文所讨论的这种阴极的响应时间,比大梯度指数掺杂方式更短^[10-11],因此这种新的掺杂方式能够进一步提高阴极的响应特性。

图 5 为相同条件下,两种掺杂方式阴极的时

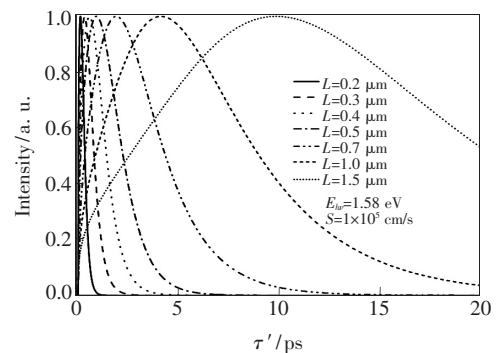


图 4 在 $E_{hv} = 1.58$ eV 时,最优系数因子 β 条件下,不同 L 下时间响应曲线。

Fig. 4 Time response curves vary with different L and optimal factor β with E_{hv} of 1.58 eV

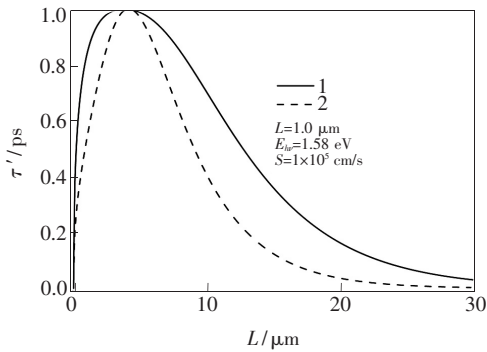


图 5 相同条件下,两种掺杂方式下的阴极时间响应曲线比较。

Fig. 5 Comparison of the time response curves about the two doping-type under the same conditions photocathodes

间响应曲线。其中曲线 1 是大梯度指数掺杂方式下的时间响应曲线,曲线 2 是本文提出的特殊掺杂方式——e 指数电场下阴极的时间响应曲线。由比较可知,在 $L = 1 \mu\text{m}$, $E_{h\nu} = 1.58 \text{ eV}$ 条件下,曲线 1 的响应峰值较曲线 2 略短,但基本上差别不大;曲线 1 的响应时间(FWHM)达到 $\sim 12 \text{ ps}$,而曲线 2 的响应时间 $\sim 8 \text{ ps}$,后者比前者的响应时间缩短了 $\sim 1/3$ 。由此可知,在相同条件下,虽

然二者的响应峰值差别不大,但由于掺杂方式的不同,使后者的响应时间比前者大大缩短,阴极的响应速度明显提高,显示了这种特殊掺杂方式阴极的时间响应特性的极大优异性。

图 6 是在如表 1 所述的最优系数因子 β 条件下,给出该种新掺杂方式阴极的时间响应的峰值 T_m (a)、时间响应的 FWHM(b)。由图可知,随着 $E_{h\nu}$ 变化,当阴极吸收区厚度 L 分别为 $0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.7, 1, 1.5 \mu\text{m}$ 时,阴极的响应峰值 T_m 分别约为 $0.1 \sim 0.15, 0.3 \sim 0.4, 0.5 \sim 0.8, 0.8 \sim 1.2, 1.7 \sim 2.6, 3.5 \sim 5.5, 8.5 \sim 13 \text{ ps}$, 阴极时间响应的 FWHM 分别约为 $0.35, 0.75, 1.3, 2.4, 7.5 \sim 8.5, 16 \sim 18 \text{ ps}$ 。阴极的 T_m 和 FWHM 均随 L 的增大而增大;相同 L 下, T_m 具有随 $E_{h\nu}$ 的增大而增大的趋势,且 L 越大,这种增大趋势越明显;而在相同 L 下, $E_{h\nu}$ 越小, FWHM 越大,且随着 $E_{h\nu}$ 的增大, FWHM 具有降低到最小值的趋势。与文献[10]中具有超快响应的大梯度指数掺杂 GaAs 光电阴极相比, T_m 和 FWHM 均大大缩短,其中 FWHM 减少量达到 $1/3$ 以上,即在相同条件下,响应时间缩短 $1/3$ 以上。响应速度的提高原因是由于在这种新的掺杂方式下,阴极吸收区内的内建电场由体内到表面逐渐降低,光电子运动速度由体内到表面逐渐降低,从而导致光电子在时间尺度上压缩的同时,在空间尺度上进一步会聚,因此阴极的响应时间大大缩短。由此得出结论,形成 e 指数电场的掺杂方式比大梯度指数掺杂方式能够使光电阴极产生更好的瞬态响应性能,能进一步大幅度提高阴极的响应速度,将进一步扩展它在超快光电响应领域、高速摄影领域等的应用。

总之,在这种新掺杂方式下, GaAs 光电阴极内具有利于缩短时间响应的 e 指数内建电场,通过系数因子 β 调节阴极内 e 指数电场分布,进一步优化了阴极的瞬态响应特性,使之在大梯度指数掺杂超快 GaAs 光电阴极的基础上,进一步大大缩短了响应时间。研究表明,在最优系数因子条件下,阴极响应时间达到 10 ps 时,该种阴极的最大厚度达到约 $1.1 \mu\text{m}$,该厚度比大梯度指数掺杂阴极更大,这将进一步提高阴极的综合响应特性,尤其是长波方面的响应特性。

3.2 量子效率分析

图 7 为最优系数因子 β 条件下阴极厚度 L 在 $0.2 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 范围时的量子效率 Y 曲线。由图可

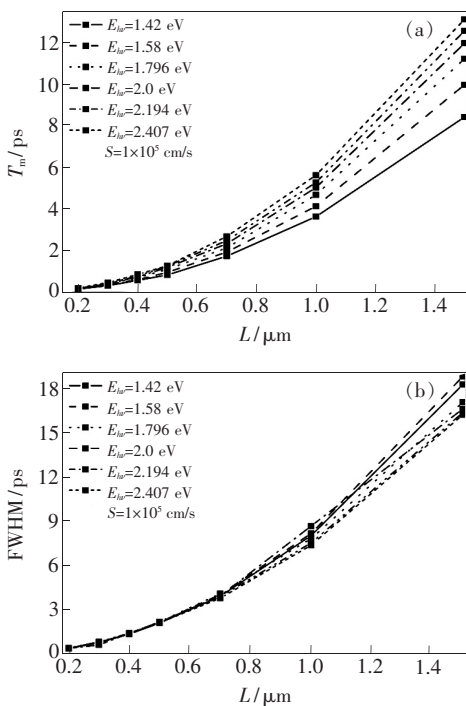


图 6 在最优系数因子 β 条件下,阴极的响应峰值 T_m (a)、半峰宽 FWHM(b) 与 $L, E_{h\nu}$ 的关系。

Fig. 6 The relationship of response peak T_m (a), FWHM (b) and $L, E_{h\nu}$ of photocathodes under the condition of optimal factor β .

知,当 $L \leq 0.5 \mu\text{m}$ 时, Y 约在 3% ~ 15% 范围;当 $L \geq 0.7 \mu\text{m}$ 时, Y 在 8% ~ 20% 范围。特别地,当 $L = 1 \mu\text{m}$ 时, Y 约为 ~ 12% ~ 20%, 此时阴极的响应时间 ~ 8 ps, 这显然对阴极在高速响应领域的应用是极为有利的。 Y 随 L 的增大而增大, 当 $L < 0.7 \mu\text{m}$ 时, 随 L 的增大 Y 持续增大; 当 $L \geq 0.7 \mu\text{m}$ 时, 随 L 的增大, 低光子能量范围的 Y 持续增大, 而高光子能量范围的 Y 逐渐达到饱和, 且随 L 的增大饱和趋势向低光子能量区域扩展。这显然与文献 [10-11] 中大梯度指数掺杂 GaAs 阴极的 Y 曲线不同: 大梯度指数掺杂下, 当 $L \geq 0.5 \mu\text{m}$ 时, 随 L 增大, Y 在高能光子范围逐渐下降, 而低能光子范围逐渐增大。当 L 在 1 ~ 1.5 μm 时, 前者的量子效率较后者高。总之, 该种掺杂方式的 GaAs

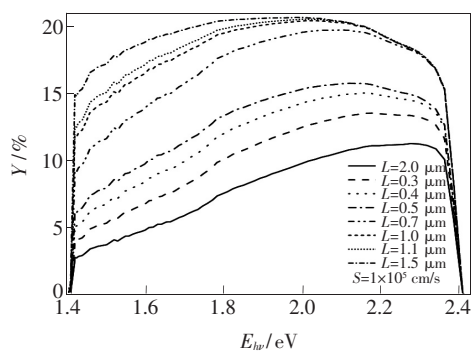


图 7 在最优系数因子 β 条件下, 不同 L 时的量子效率曲线。

Fig. 7 Yield Y vary with different L under the condition of optimal factor β

光电阴极具有良好的量子效率特性, 且在低能量光子区域的响应特性明显优于相同条件下均匀掺杂和具有超快响应的大梯度指数掺杂方式的 GaAs 光电阴极^[10-11], 这显然有利于 GaAs 光电阴极在近红外光波段领域的诸多应用。

4 结 论

本文根据 GaAs 半导体的吸收特性, 设计并讨论了一种特殊梯度掺杂方式的阴极——具有 e 指数内建电场的 GaAs 光电阴极, 研究了它在厚度 0.2 ~ 1.5 μm 范围、入射光子能量 1.4 ~ 2.4 eV 波段范围的时间响应和量子效率两大响应特性, 同时得出在该种掺杂方式下阴极具有最短响应时间的条件——不同阴极厚度和入射光子能量条件下的最优掺杂系数因子。研究表明, 该种掺杂方式下的阴极具有更优异的时间响应特性, 尤其在 1.1 μm 时, 响应时间达到 10 ps, 量子效率达到 12.5% ~ 20%, 较之大梯度指数掺杂阴极具有更好的时间响应特性和更高的量子效率。该种阴极优化了以往提出的具有超快时间响应的大梯度指数掺杂 GaAs 光电阴极, 使 GaAs 光电阴极具有更好的响应特性, 能够满足新一代 10 ps 量级超快响应器件, 诸如高速摄影、光电倍增、FEL 及高能物理的电子源等的应用要求, 为 GaAs 光电阴极以及其他半导体 NEA 阴极在高速响应领域的应用提供了必要的理论及数据支持。

参 考 文 献:

- [1] KARKARE S, BOULET L, CULTRERA L, *et al.*. Ultrabright and ultrafast III-V semiconductor photocathodes [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, 112(9):097601.
- [2] KARKARE S, DIMITROV D, SCHAFF W, *et al.*. Monte Carlo charge transport and photoemission from negative electron affinity GaAs photocathodes [J]. *J. App. Phys.*, 2013, 113:104904.
- [3] SCHWEDE J W, SARMIENTO T, NARASIMHAN V K, *et al.*. Photon-enhanced thermionic emission from heterostructures with low interface recombination [J]. *Nat. Commun.*, 2013, 4:67-72.
- [4] DOWELL D H, BAZAROV I, DUNHAM B, *et al.*. Cathode R&D for future light sources [J]. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, 2010, 622(3):685-697.
- [5] 姜德龙, 房立峰, 那廷祥, 等. 微通道板离子壁垒膜粒子阻透特性的蒙特卡罗模拟 [J]. *发光学报*, 2011, 32(8): 816-820.
JIANG D L, FANG L F, NA Y X, *et al.*. Monte-Carlo simulations on the stopping and transmittance characteristics of particles in the ion barrier film of microchannel plate [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2011, 32(8):816-820. (in Chinese)
- [6] ZHAO J, CHANG B K, XIONG Y J, *et al.*. Influence of the antireflection, window, and active layers on optical properties of exponential-doping transmission-mode GaAs photocathode modules [J]. *Opt. Commun.*, 2012, 285(5):589-593.
- [7] JONES L B, ROZHKOVA S A, BAKIN V V, *et al.*. Cooled transmission-mode NEA-photocathode with a band-graded

- active layer for high brightness electron source [J]. *Spin Phys. : 18th Int. Spin Phys. Symp.*, 2009, 1149(1): 1057-1061.
- [8] PHILLIPS C C, HUGHES A E, SIBBERT W. Quantitative XPS surface chemical analysis and direct measurement of the temporal response times of glass-bonded NEA GaAs transmission photocathodes [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1984, 17:1713-1725.
- [9] AULENBACHER K, SCHULER J, HARRACH D V. Pulse response of thin III/V semiconductor photocathodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, 92(12):7536-7543.
- [10] CAI Z P, YANG W Z, TANG W D, *et al.*. Numerical analysis of temporal response of a large exponential-doping transmission-mode GaAs photocathode [J]. *Mater. Sci. Semicond. Proc.*, 2013, 16(2):238-244.
- [11] 蔡志鹏. 用于双微带阴极选通型分幅相机的改进型第三代像增强器研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2013.
CAI Z P. *Research on Improved Third Generation Image Intensifier for Dual Microstrip Cathode Gated Framing Camera* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [12] GUO L H, LI J M, HOU X. Calculation of temporal response of field-assisted transmission-mode GaAs NEA photocathodes [J]. *Solid State Electron.*, 1990, 33(4):435-439.
- [13] ZHANG Y J, NIU J, ZOU J J, *et al.*. Variation of spectral response for exponential-doped transmission-mode GaAs photocathodes in the preparation process [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(20):3935-3940.
- [14] VERGARA G, HERRERA-G A, SPICER W E. Influence of the dopant concentration on the photoemission in NEA GaAs photocathodes [J]. *J. Appl. Phys.*, 1996, 80:1809-1815.
- [15] TEREKHOV A S, ORLOV D A. Photoelectron thermalization near the unpinned surface of GaAs photocathodes [J]. *SPIE*, 1991, 2550:157-164.
- [16] 乔建良, 常本康, 牛军, 等. NEA GaN 和 GaAs 光电阴极激活机理对比研究 [J]. *真空科学与技术学报*, 2009, 29(2):115-118.
QIAO J L, CHANG B K, NIU J, *et al.*. Similarities and differences between negative electron affinity GaN and GaAs photocathode activation mechanisms [J]. *Chin. J. Vac. Sci. Technol.*, 2009, 29(2):115-118. (in Chinese)
- [17] TIWARI S, WRITHT S L. Material properties of p-type GaAs at large dopings [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(6): 563-565.



蔡志鹏(1980 -),男,河南平顶山人,博士,讲师,2013年于中科院西安光机所获得博士学位,主要从事半导体光电子器件的理论与技术的研究。

E-mail: caizp001@126.com