

Д. ф.-м. н. Г. П. КОВТУН, к. т. н. А. И. КРАВЧЕНКО,
А. И. КОНДРИК, А. П. ЩЕРБАНЬ

Дата поступления в редакцию
24.09 2004 г.

Украина, ННЦ «Харьковский физико-технический институт»
E-mail: gkovtun@kipt.kharkov.ua

Оппонент д. т. н. В. К. КОМАРЬ
(Институт монокристаллов, г. Харьков)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ УЛУЧШЕНИЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ВЫРАЩИВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ GaAs МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО

Лучшие результаты достигаются при боковом варианте нагрева тигля, выбором мощности дополнительного нагревателя, а также применением теплового экранирования кристалла и флюса.

В связи с работой по совершенствованию технологии получения малодислокационных монокристаллов GaAs (см. [1]) представляет интерес компьютерное моделирование теплового поля в растущем кристалле. В первом приближении плотность дислокаций N_D в кристалле как характеристика совершенства кристалла прямо пропорциональна значениям осевого G_z и радиального G_r градиентов температуры вблизи фронта кристаллизации. (Более детальный анализ термоупругих напряжений в кристалле связан с представлениями о тензорном характере величины и требует учета кривизны температурного поля, определяемой второй производной температуры [2].)

Целью данной работы было изучение закономерностей формирования теплового поля в кристалле GaAs, выращиваемом методом Чохральского с применением специальных приемов: а) применение дополнительного кольцевого нагревателя вблизи фронта кристаллизации; б) применение теплового экранирования поверхности кристалла и/или поверхности расплава (поверхности флюса над расплавом).

Расчет теплового поля в кристалле выполнялся с помощью компьютерной программы GALEZ [3], реализующей метод конечных элементов для решения уравнений теплопроводности при заданных тепловых потоках q_0 через дно и q_1 через стенку тигля и удельной мощности тепловыделения Q дополнительного нагревателя. Значения используемых физических констант и параметров расчета взяты из публикаций [4, 5]. Геометрические размеры изучаемой системы «расплав — флюс B_2O_3 — погруженный во флюс дополнительный нагреватель — кристалл» показаны на рис. 1. Единица длины

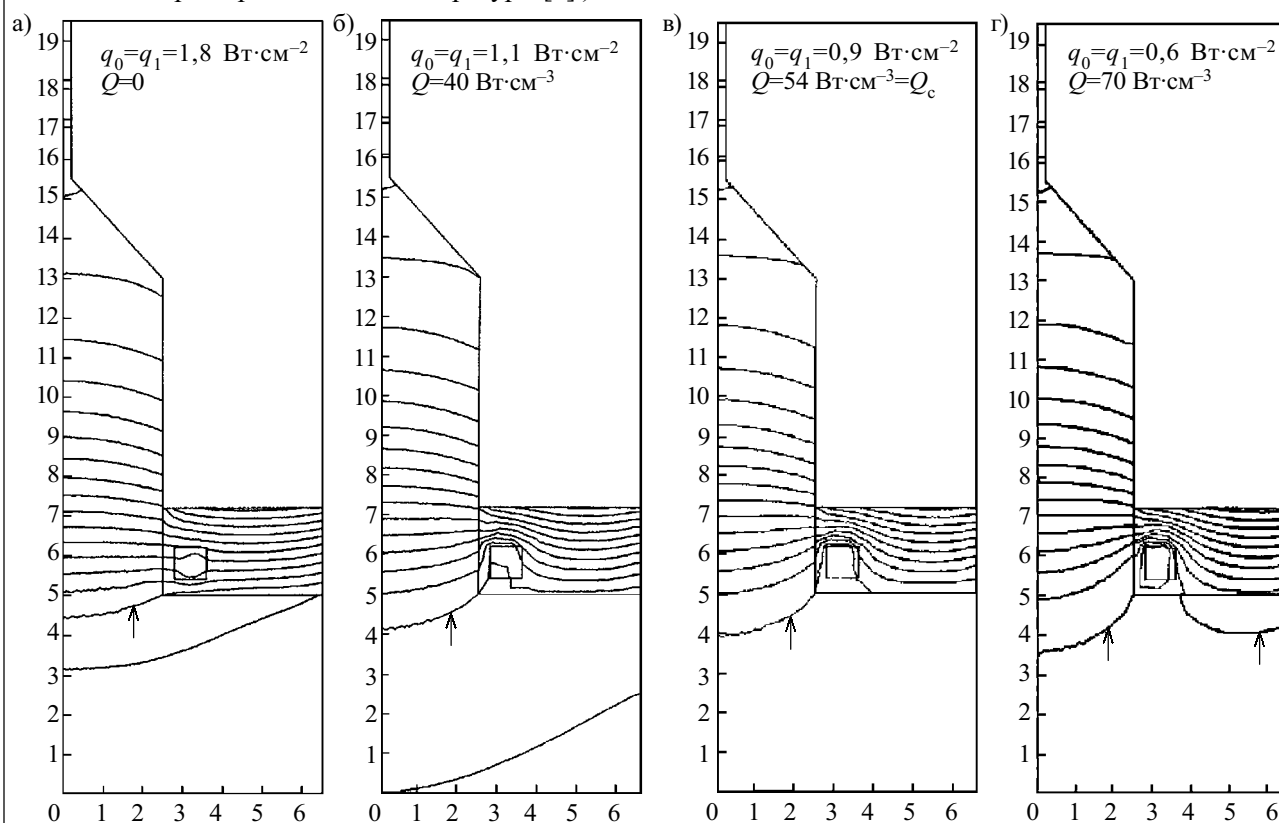


Рис. 1. Температурное поле в кристаллах GaAs при различной мощности дополнительного нагревателя

Классификация конструкций тепловых узлов по величине соотношения между тепловыми потоками (стрелка показывает направление теплового потока)

q_0	q_1		
	1) $q_1 < 0$	2) $q_1 = 0$	3) $q_1 > 0$
1) $q_0 < 0$	11 $\begin{array}{c} \text{---} \rightarrow \\ \downarrow \end{array}$	12 $\begin{array}{c} \text{---} \mid 0 \\ \downarrow \end{array}$	13 $\begin{array}{c} \text{---} \leftarrow \\ \downarrow \end{array}$
2) $q_0 = 0$	21 $\begin{array}{c} \text{---} \rightarrow \\ 0 \end{array}$	22 $\begin{array}{c} \text{---} \mid 0 \\ 0 \end{array}$	23 $\begin{array}{c} \text{---} \leftarrow \\ 0 \end{array}$
3) $q_0 > 0$	31 $\begin{array}{c} \text{---} \rightarrow \\ \uparrow \end{array}$	32 $\begin{array}{c} \text{---} \mid 0 \\ \uparrow \end{array}$	33 $\begin{array}{c} \text{---} \leftarrow \\ \uparrow \end{array}$

на осях рисунков равна 1 см, изотермы проведены с интервалом 50 К, изотерма с температурой плавления арсенида галлия 1511 К отмечена стрелкой.

По величине соотношения между тепловыми потоками q_0 и q_1 может быть введена классификация конструкций тепловых узлов, показанная в **таблице**.

Для изучения были выбраны тепловые узлы следующих вариантов: 32 (донный нагрев), 33 (донно-боковой нагрев), 23 (боковой нагрев) и 13 (боковой нагрев с донным теплоотводом). При выполнении расчетов было установлено, что значение удельной мощности Q дополнительного нагревателя не может быть сколь угодно большим: при повышении мощности Q до некоторого критического значения Q_c (зависящего от выбранного соотношения между q_0 и q_1) возникает «паразитная» кристаллизация материала на стенке тигля, как это показано на рис. 1, з, что связано с необходимостью снижения значений q_0 и q_1 для сохранения заданного диаметра кристалла при росте величины Q .

Когда дополнительный нагреватель отсутствует или не включен ($Q=0$), вертикальная составляющая температурного градиента на оси кристалла $G_z(0)$ и вблизи поверхности кристалла $G_z(R)$ почти не зависит от соотношения между потоками q_0 и q_1 (рис. 2). При включенном дополнительном нагревателе переход от донного нагрева (вариант 32) к донно-боковому (вариант 33) и далее к боковому (вариант 23) и к боковому с донным теплоотводом (вариант 13) сопровождается увеличением критической мощности Q_c дополнительного нагревателя. При этом уменьшается значение $G_z(0)$ на оси кристалла (примерно в 2 раза) и, особенно, $G_z(R)$ на поверхности кристалла (пример-

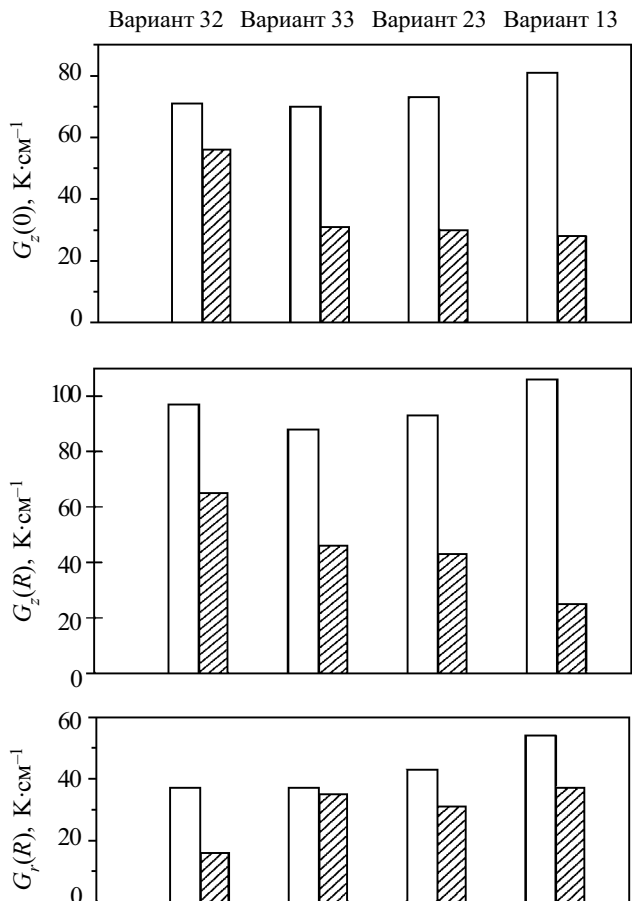


Рис. 2. Зависимость составляющих температурного градиента $G(0)$ на оси и $G(R)$ вблизи поверхности кристалла GaAs от мощности дополнительного нагревателя для различных вариантов основного нагревателя ($Q=0$ — светлое поле; $Q=Q_c$ — темное поле)

но в 2½ раза, см. рис. 2). Радиальная составляющая $G_r(R)$ в кристалле при этом возрастает примерно в 2 раза (на оси кристалла $G_r(0)=0$).

На **рис. 3** показано радиальное распределение значений G_z и G_r в кристалле при различных значениях соотношения между q_0 и q_1 . Приведено также радиальное распределение величины модуля $G=(G_z^2+G_r^2)^{1/2}$ вектора температурного градиента.

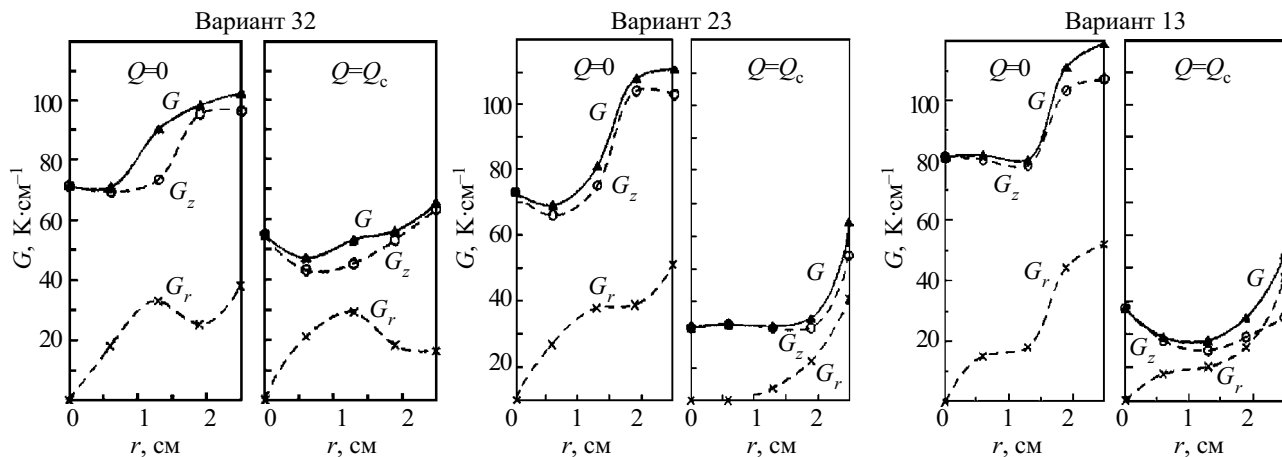


Рис. 3. Радиальное распределение составляющих G_z и G_r , а также модуля G температурного градиента в кристалле GaAs

Когда дополнительный нагреватель отсутствует, зависимости $G_z(r)$, а также и $G(r)$, для различных значений соотношения между q_0 и q_1 имеют сходный вид: неравномерный с минимумом при некотором значении радиуса r . При включенном дополнительном нагревателе и $Q=Q_c$ характер зависимостей $G_z(r)$ и $G(r)$ изменяется: при переходе от донного нагрева (вариант 32) к боковому (вариант 23) на графиках $G_z(r)$ и $G(r)$ исчезает минимум и распределение становится равномерным (за исключением приповерхностной области кристалла). Однако при дальнейшем переходе к боковому нагреву с донным теплоотводом (вариант 13) радиальное распределение значений G_z и G_r вновь становится неравномерным.

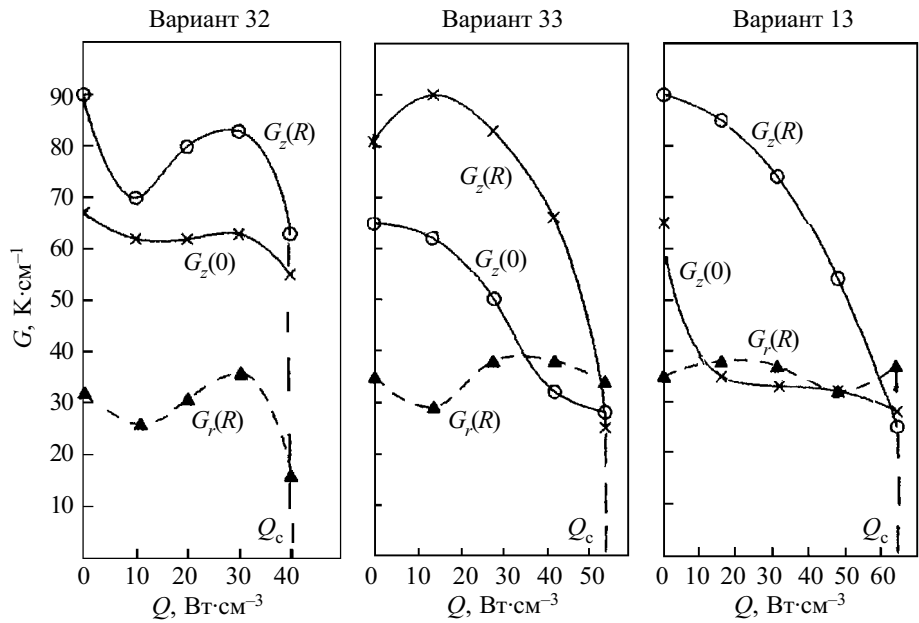


Рис. 4. Зависимости составляющих температурного градиента в кристалле GaAs от мощности дополнительного нагревателя для различных вариантов основного нагревателя

Сложный вид имеют и зависимости составляющих температурного градиента в кристалле от мощности дополнительного нагревателя (рис. 4), характер этих зависимостей также связан с величиной соотношения между q_0 и q_1 . Так, в варианте 13 зависимость $G_z(R)$ монотонно убывает, в то время как в варианте 32 для этой же зависимости наблюдаются промежуточные минимум и максимум.

Увеличение диаметра кольца дополнительного нагревателя сопровождается увеличением критической мощности Q_c , однако достигаемые при этом значения $G_z(r)$ и $G(r)$ заметно превышают значения, достигаемые при малой удаленности нагревателя от поверхности кристалла.

Влияние теплового экранирования изучалось на примере теплового узла с боковым нагревом тигля (вариант 23). Для этого выполнялись расчеты, в которых значения излучательной способности кристалла ϵ_c и флюса ϵ_f были уменьшены в 10 раз по сравнению со справочными значениями. Результаты расчетов приведены на рис. 5 и 6.

Когда дополнительный нагреватель отсутствует или не включен, но применяется тепловое экранирование кристалла и флюса, значение величины $G_z(0)$ на оси кристалла заметно уменьшается, особенно при совместном экранировании кристалла и флюса, когда $G_z(0)$ уменьшается примерно в 2½ раза. (При раздельном экранировании более эффективно экранирование кристалла.) $G_z(R)$ на поверхности кристалла несколько возрастает при раздельном экранировании кристалла и флюса, но уменьшается при совместном экранировании.

При включении дополнительного нагревателя и увеличении его мощности до величины Q_c значения $G_z(0)$ и $G_z(R)$ заметно снижаются, причем лучшие результаты дает экранирование флюса либо совместное экранирование кристалла и флюса. В последнем случае $G_z(0)$ и $G_z(R)$ уменьшаются почти в 6 раз по

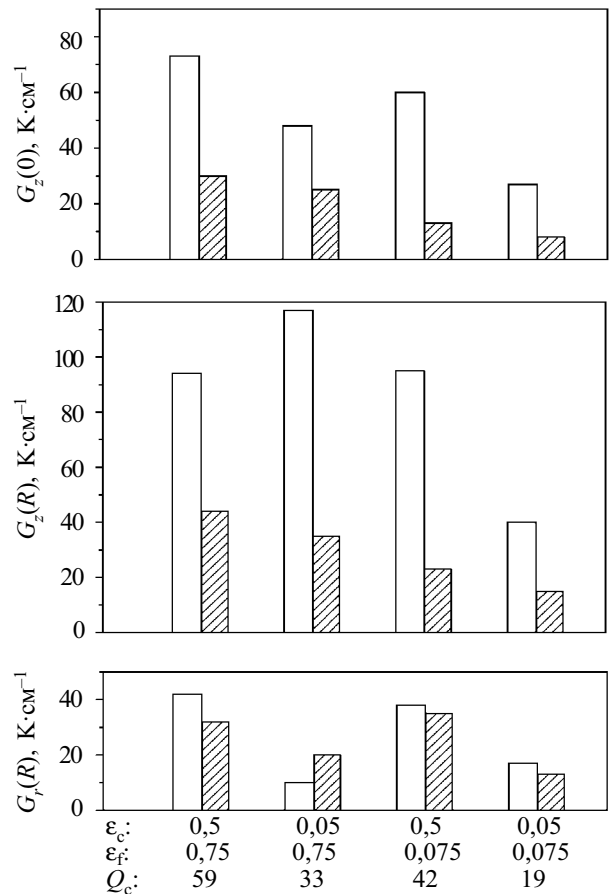


Рис. 5. Зависимость составляющих температурного градиента $G(0)$ на оси и $G(R)$ вблизи поверхности кристалла GaAs от мощности дополнительного нагревателя при боковом нагреве тигля (вариант 23) и различных условиях теплового экранирования кристалла и поверхности флюса: ϵ_c и ϵ_f — излучательная способность кристалла и флюса, соответственно; $Q=0$ — светлое поле; $Q=Q_c$ — темное поле

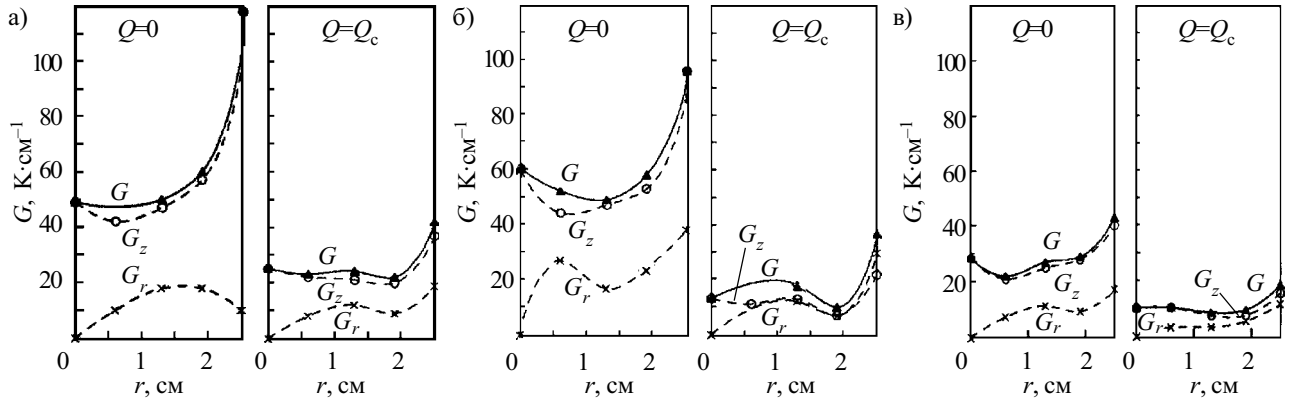


Рис. 6. Радиальное распределение составляющих G_z и G_r , а также модуля G температурного градиента при боковом нагреве тигля (вариант 23):

а — при тепловом экранировании кристалла; б — при тепловом экранировании флюса; в — при тепловом экранировании кристалла и флюса

сравнению со случаем, когда дополнительное тепловое экранирование и погруженный нагреватель отсутствуют. При этом минимальных значений достигает и $G_r(R)$, а радиальное распределение значений G_z и G становится наиболее равномерным.

Сделаны следующие выводы:

1. В случае, когда дополнительный нагреватель отсутствует, значения осевого и радиального температурных градиентов почти не зависят от соотношения между потоками q_0 и q_1 .

2. Мощность дополнительного нагревателя имеет предел (критическая мощность), превышение которого приводит к возникновению «паразитной» кристаллизации материала на стенке тигля.

3. Значение критической мощности дополнительного нагревателя возрастает при переходе от донного нагрева тигля ($q_0 > 0, q_1 = 0$) к донно-боковому ($q_0 > 0, q_1 > 0$) и далее к боковому ($q_0 = 0, q_1 > 0$) и боковому с донным теплоотводом ($q_0 < 0, q_1 > 0$). При этом уменьшается осевой температурный градиент на оси кристалла (примерно в 2 раза) и вблизи поверхности (примерно в 2½ раза) и возрастает радиальный градиент (примерно в 2 раза вблизи поверхности кристалла).

4. Форма радиального распределения осевого и радиального температурных градиентов при отсутствии дополнительного нагревателя почти не зависит от соотношения между тепловыми потоками q_0 и q_1 . При включенном дополнительном нагревателе величина соотношения между q_0 и q_1 влияет на форму радиального распределения значений осевого и радиального температурного градиентов; наиболее равномерное распределение значений осевого градиента и модуля температурного градиента достигается в варианте бокового нагрева тигля.

5. Характер зависимости осевого температурного градиента от мощности дополнительного нагревателя зависит от соотношения между q_0 и q_1 : при донном нагреве тигля зависимость имеет промежуточные минимум и максимум, в то время как при боковом нагреве с донным теплоотводом эта зависимость является монотонно убывающей.

6. Лучшие результаты с учетом значений осевого и радиального температурных градиентов, а также равномерности их радиального распределения, достигаются при боковом варианте нагрева тигля и мощности дополнительного нагревателя, близкой к критической величине, с применением теплового экранирования кристалла и флюса. В этом случае значения осевого и радиального температурного градиента уменьшаются в несколько раз.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ковтун Г. П., Кравченко А. И., Щербань А. П. Установка для выращивания малодислокационных монокристаллов GaAs большого диаметра // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 6.— С. 52—53.
2. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников.— М.: Металлургия, 1984.
3. Жуков А. И. Расчет температурных полей в кристаллах, выращиваемых по методу Чохральского // Препринт ХФТИ 92-17.— Харьков: ХФТИ, 1992.
4. Growley A. B., Stern E. J., Hurlle D. T. J. Modelling of the growth of GaAs by LEC technique. 1. Thermal distribution in the crystal // J. Cryst. Growth.— 1989.— Vol. 97, N 3.— P. 697—708.
5. Moduoye G. O., Bacon D. J., Evans K. E. Computer modelling of temperature and stress distribution in LEC-grown GaAs crystals // Ibid.— 1991.— Vol. 108, N 2.— P. 627—636.

ПАМЯТНЫЕ ДАТЫ В 2005 ГОДУ

- 220 лет со времени установления (1785) французским ученым Ш.-О. Кулоном основного закона электростатики (закона Кулона).
- 150 лет назад (1855) итальянский метеоролог Л. Пальмери изобрел сейсмограф для измерения силы землетрясений.
- 50 лет назад (1955) в США создан первый транзисторный компьютер.

Из "Календаря юбилейных и памятных дат в области естествознания и техники на 2005 год".— М.: Политехнический музей, 2004.

- 150 лет назад (1855) английский физик и изобретатель Д.-Э. Юз запатентовал созданный им буквопечатающий телеграфный аппарат.
- 125 лет назад (1880) русский ученый-физик и биофизик П. И. Бахметьев создал проект одноканальной телевизионной системы со спиральной оптико-механической разверткой изображения ("телефотограф").
- 125 лет назад (1880) открыт пьезоэлектрический эффект французскими учеными физиком П. Кюри и кристаллографом Ж. Кюри.