

Радиационное охлаждение в условиях магнитоконцентрационного эффекта

© А.И. Липтуга, В.К. Малютенко, В.И. Пипа, Л.В. Леваш*

Институт физики полупроводников Национальной академии наук Украины,
252650 Киев, Украина

*Институт физики Национальной академии наук Украины,
252028 Киев, Украина

(Получена 12 мая 1996 г. Принята к печати 26 июня 1996 г.)

Представлены результаты теоретического и экспериментального исследования временных зависимостей эффекта радиационного охлаждения, вызываемого импульсным полупроводниковым источником отрицательной межзонной люминесценции. Изучена кинетика охлаждения и последующая температурная релаксация пассивного элемента, зависящие от мощности и длительности импульса люминесценции. Показано, что использованный метод возбуждения люминесценции (магнитоконцентрационный эффект) дает возможность как радиационного охлаждения, так и нагрева пассивного элемента, что перспективно для практического применения. Результаты теоретического исследования качественно согласуются с экспериментальными данными. Максимальное охлаждение, достигнутое в эксперименте при комнатной температуре, равно 0.62 К.

Одним из проявлений отрицательной люминесценции полупроводников [1,2] является эффект радиационного охлаждения (ЭРО) [3]. Суть эффекта в следующем. Если концентрации неравновесных электронов и дырок поддерживаются каким-либо способом меньшими равновесных значений, то интенсивность излучательной рекомбинации становится ниже интенсивности равновесного излучения [4]. В результате в спектральной области $\omega > E_g/\hbar$ (E_g — ширина запрещенной зоны) процесс поглощения доминирует над излучением, т.е. возникает поток энергии излучения извне к поверхности полупроводника. Таким образом, полупроводник поглощает тепловое излучение окружающих тел в этой части спектра и тем самым может понижать их температуру.

Впервые ЭРО был обнаружен в работе [3]. В качестве охлаждающего (активного) элемента использовался кристалл InSb в условиях магнитоконцентрационного эффекта, являющегося одним из наиболее эффективных и хорошо изученных способов возбуждения отрицательной люминесценции. Он реализуется в полупроводниковой пластине, помещенной в магнитное поле \mathbf{H} и в перпендикулярное к нему тянущее электрическое поле \mathbf{E} . При этом возле одной из широких граней пластины, параллельной \mathbf{H} и \mathbf{E} , характеризующейся малой скоростью поверхностной рекомбинации, возникает биполярное обеднение и, следовательно, подавляется излучение с этой грани в спектральной области $\omega > E_g/\hbar$. При изменении полярности управляющего напряжения эта поверхность обогащается неравновесными носителями, что приводит к избыточному излучению.

Так как охлаждающий элемент при прохождении тока нагревается, его тепловое излучение в остальной части спектра ($\omega < E_g/\hbar$) увеличивается, что само по себе ведет к нагреву оптически сопряженного с ним охлаждаемого (пассивного) элемента. Поэтому величина ЭРО зависит не только от мощности отрицательной люминесценции, но и от длительности ее импульса.

Проведенный в [3] анализ эффекта основывался на предположении, что изменение температуры охлаждаемого слоя пропорционально мощности люминесценции, что справедливо без учета джоулевого нагрева активного элемента. Теоретическое исследование основных закономерностей ЭРО с учетом теплового излучения нагретого тока охлаждающего элемента проведено в работе [5].

Настоящая работа посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию временных и полевых зависимостей ЭРО, вызываемого полупроводниками в условиях магнитоконцентрационного эффекта. Изучается кинетика охлаждения и последующей температурной релаксации охлаждаемого слоя. Обсуждаются возможности практического использования исследуемого радиационного эффекта, позволяющего как охлаждать, так и нагревать пассивный элемент.

1. Методика экспериментальных исследований

Исследования ЭРО проводились при $T = 300$ К с использованием в качестве активного элемента полупроводниковых кристаллов InSb и CdHgTe. Кристаллы были выполнены в виде тонких пластин (размеры $(0.015-0.02) \times 3 \times 8$ мм³), снабженных омическими контактами. Полупроводник приклеивался на подложку, которая с помощью теплопроводящей пасты крепилась на медном радиаторе. Последний был встроен в корпус вакуумной капсулы таким образом, что та его часть, к которой крепился полупроводниковый кристалл, находилась внутри капсулы. В капсуле, в непосредственной близости от поверхности полупроводника с малой скоростью поверхностной рекомбинации (на расстоянии $\simeq 1.5$ мм), располагался охлаждаемый элемент. Между охлаждающим и охлаждаемым элементами помещался оптический фильтр. Измерительная капсула располагалась между полюсами магнита, магнитное поле

можно было регулировать в пределах от 0 до 20 кЭ. Длительность импульсов управляющего электрического поля t_i изменялась от 30 до 500 мс.

Выбор полупроводниковых материалов, используемых в качестве активного элемента, диктуется в первую очередь возможностью получения большой мощности отрицательной люминесценции. Последняя при одинаковом биполярном обеднении полупроводника тем больше, чем меньше ширина запрещенной зоны. Максимально возможная величина модулируемого потока излучения P_0 достигается при полном биполярном истощении приповерхностной области полупроводника. Согласно [2], P_0 с уменьшением E_g увеличивается по закону $E_g^3 \exp(-E_g/kT)$ при $E_g > kT$.

В качестве охлаждаемого элемента использовался монокристалл танталата лития, представляющий собой тонкую пластину ($0.015 \times 3 \times 8 \text{ мм}^3$) с нанесенными на широкие грани металлическими электродами. С помощью тонких контактных проволочек пластина удерживалась в фиксированном положении, не касаясь других элементов капсулы. Одна из широких граней охлаждаемого элемента (обращенная к полупроводниковой пластине) подвергалась чернению. Охлаждаемый пироэлектрический элемент, служащий датчиком температуры, обладал высокой температурной чувствительностью (на уровне 0.01 К) и включался в усилительную схему с высокоомным входом [6].

2. Результаты и их обсуждение

Изменение температуры охлаждаемого слоя $T(t)$ в условиях, когда длительность импульса люминесценции t_i значительно превышает характерное время охлаждения слоя, рассчитывалось в [5]. Исследуем здесь зависимость $T(t)$ для импульса конечной длительности. При $0 < t < t_i$ температура охлаждаемого элемента $T(t)$ описывается уравнением

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T - T_0}{\tau} = \frac{T_0 t}{\tau \tau_s} - W. \quad (1)$$

Здесь $T_0 = T(0)$ — начальная температура охлаждаемого элемента и охлаждающего полупроводника (состояние равновесия), τ — время охлаждения слоя, обусловленного его тепловым излучением, τ_0 — постоянная, определяющая джоулев нагрев полупроводника (предполагается, что его температура T_s увеличивается по закону $T_s = T_0(1 + t/\tau_s)$, где $\tau_s \sim I^{-2}$ для полупроводника с однородным по поперечному сечению током I), W — величина, пропорциональная мощности отрицательной люминесценции.

Согласно [4],

$$\tau = \frac{\rho C d}{4\sigma T_0^3(1 - R)}, \quad W = \frac{P}{\rho C d}, \quad (2)$$

где ρ , C и d — плотность, удельная теплоемкость и толщина слоя, σ — постоянная Стефана–Больцмана,

R — коэффициент отражения излучения от поверхности полупроводника, усредненный по всему спектру ($0 \leq \omega < \infty$), P — мощность отрицательной люминесценции. Выражение для τ приведено для случая, соответствующего условиям эксперимента, когда передняя (обращенная к полупроводнику) поверхность зачернена, а задняя металлизирована.

Время t_1 , за которое создается дефицит фотонов, можно оценить как время биполярного обеднения приповерхностного слоя полупроводника толщиной порядка α^{-1} (α — коэффициент межзонного поглощения). При магнитоконцентрационном эффекте $t_1 \simeq (\alpha V)^{-1}$, где $V = \mu_n \mu_p H F / c$ — скорость поперечного дрейфа электронно-дырочных пар, μ_n , μ_p — подвижности электронов и дырок, c — скорость света. После выключения напряжения рекомбинационное излучение восстанавливается до равновесного значения за время t_2 порядка времени рекомбинации. В условиях эксперимента $t \simeq 10^{-9}$ с, $t_2 \simeq 10^{-8}$ с, а тепловые постоянные τ , $\tau_s \gg t_1, t_2$ ($\tau \simeq 1$ с, а τ_s , по нашим оценкам, в зависимости от управляющего напряжения изменялось в пределах 100–1000 с), поэтому импульс люминесценции можно рассматривать как прямоугольный.

Для $\Delta T = T - T_0$ из (1) при $t \leq t_i$ получаем

$$\Delta T = \tau(W + T_0/\tau_e)(e^{-t/\tau} - 1) + T_0 t/\tau_s. \quad (3)$$

После выключения управляющего напряжения температура охлаждаемого элемента начинает понижаться главным образом из-за контакта с подложкой. Для малого интервала времени после $t = t_i$, за которое происходит релаксация температуры тонкого охлаждаемого слоя, изменением температуры полупроводника можно пренебречь. В этом случае температура $T(t)$ описывается уравнением (1), в котором правая часть теперь равна $T_0 t_i/\tau \tau_s$. Решение при $t \geq t_i$ имеет вид

$$\Delta T = \tau(W + T_0/\tau_s) \left(e^{-t/\tau} - e^{-(t_i-t)/\tau} \right) + T_0 t_i/\tau_s. \quad (4)$$

Экспериментальные зависимости температуры $\Delta T(t)$ от величины управляющего напряжения и длительности импульса (осциллограммы) представлены соответственно на рис. 1, *a, b*. Теоретические зависимости $\Delta T(t)$, рассчитанные при различных значениях мощности и длительности импульса люминесценции, иллюстрируются на рис. 2, *a, b*. Для расчета использовалось значение $\tau = 0.74$ с, которое получается из формулы (2) при значениях параметров танталата лития [7] $\rho = 7.3 \text{ г/см}^3$, $C = 0.42 \text{ Дж/г} \cdot \text{К}$, при $T = 300 \text{ К}$ и $R = 0.36$. Параметр джоулевого нагрева полупроводника τ_s оценивался по температурной релаксации пассивного элемента после выключения импульса отрицательной люминесценции. При изменении мощности люминесценции W , которая линейно зависит от приложенного напряжения U , использовалась зависимость $\tau_s(U) \sim U^{-2}$.

Особенности экспериментальных наблюдений ЭРО связаны с тем, что при приложении управляющего напряжения к охлаждаемому элементу его температура

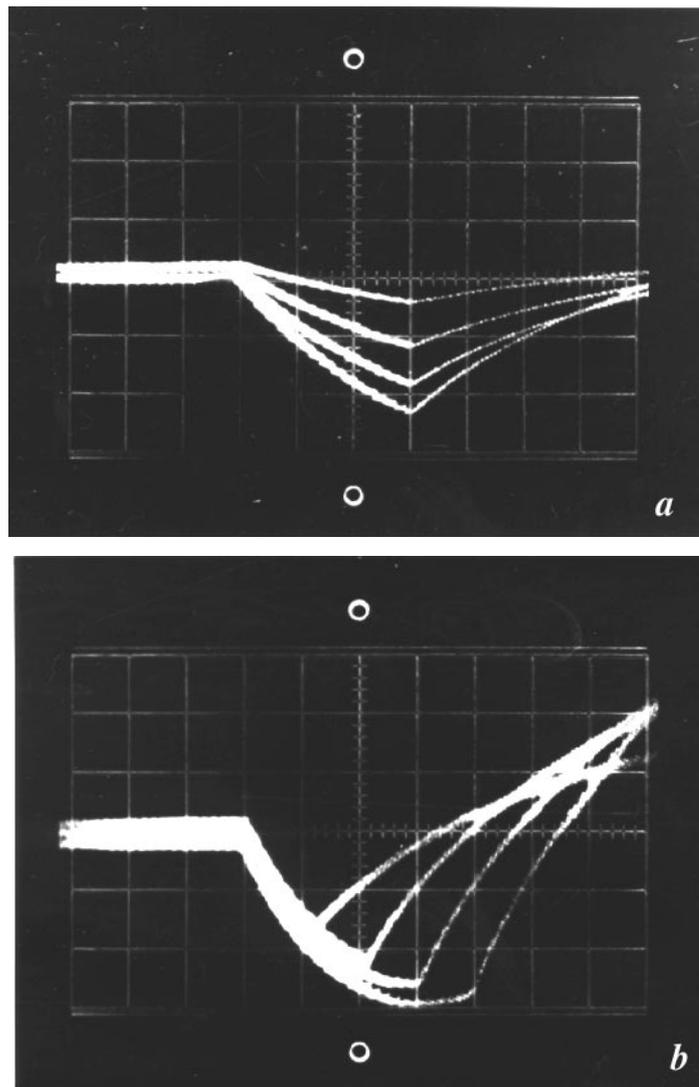


Рис. 1. Осциллограммы электрического сигнала пассивного элемента (температура элемента). Напряженность магнитного поля $H = 15$ кЭ; *a* — длительности импульсов отрицательной люминесценции 300 мс, напряжение, В: 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 (осциллограммы сверху вниз), охлаждающий элемент — InSb; *b* — напряжение 3.2 В, длительности импульсов отрицательной люминесценции, мс: 100, 200, 300, 400 (осциллограммы слева направо), охлаждающий элемент — $\text{Cd}_{0.19}\text{Hg}_{0.81}\text{Te}$.

всегда повышалась (джоулев нагрев). Увеличение температуры полупроводника зависело от длительности и амплитуды управляющего напряжения, а также количества энергии, теряемой кристаллом за счет теплоотвода в подложку. В результате в течение времени, соответствующего длительности импульса, конкурировали два процесса — отрицательная люминесценция (спектральный диапазон $E_g/\hbar < \omega < \infty$, охлаждение) и неравновесное тепловое излучение (диапазон $0 < \omega < E_g/\hbar$, нагрев). Естественно, воздействие отрицательной люминесценции должно приводить к понижению температуры охлаждаемого элемента, а увеличение интенсивности теплового излучения к его нагреву, т.е. охлаждающий элемент совмещал свойства радиационного холодильника и нагревателя одновременно. Отметим, что начало воздействия отрицательной люминесценции во време-

ни соответствовало переднему фронту управляющего импульса, тепловой же поток, исходящий из активного элемента, возрастал по мере нагрева полупроводника проходящим током.

Между полупроводниковым кристаллом и охлаждаемым элементом устанавливался массивный поглощающий фильтр, пропускающий излучение в спектральном диапазоне $\omega > E_g/\hbar$. Это позволило в значительной степени уменьшить влияние теплового излучения активного элемента на охлаждаемый, хотя полностью исключить его не удалось. Предельное понижение температуры охлаждаемого элемента в условиях эксперимента зависело также от тепла, поступающего на этот элемент за счет теплопроводности через металлические контакты-держатели (капсула вакуумирована, конвекция отсутствовала).

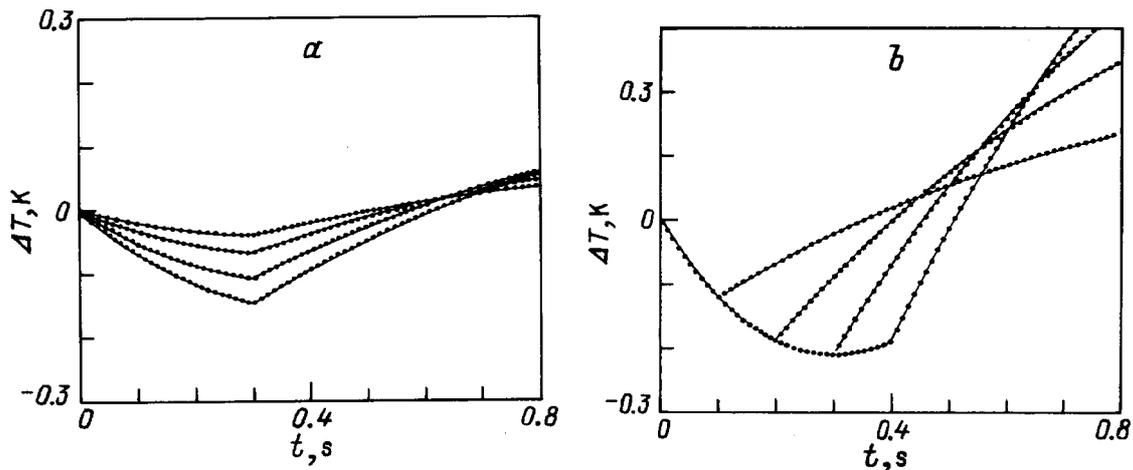


Рис. 2. Кинетика температуры охлаждаемого элемента (теория) в зависимости от мощности (а) и длительности (b) импульсов отрицательной люминесценции; а — ($P, \text{Вт/см}^2, \tau_s, c$): (0.0016, 800), (0.0026, 550), (0.0046, 360), (0.006, 300) (кривые сверху вниз), $\tau = 0.74 \text{ с}$; б — $P = 0.01 \text{ Вт/см}^2, \tau_s = 100 \text{ с}, \tau = 0.74 \text{ с}$. $t_i, \text{мс}$: 100, 200, 300, 400 (кривые слева направо).

На рис. 3 представлена зависимость изменения (максимальное значение, достигаемое за время импульса) температуры охлаждаемого элемента от величины напряжения, прикладываемого к активному элементу (кристалл InSb). Параметром кривых является длительность импульса электрического поля t_i . Видно, что при малой длительности импульса (кривые 1, 1', 2, 2') зависимость изменения температуры пассивного элемента от напряжения близка к линейной. При больших длительностях сказывается нагрев решетки InSb (небольшая

доля теплового излучения полупроводника проникает через фильтр), что приводит к сублинейности кривых охлаждения (3–6) и сверхлинейности кривых нагревания (3'–6'). Увеличение напряжения (рис. 1, а) и длительности импульса (рис. 1, б) ведет к заметной конкуренции теплового излучения и отрицательной люминесценции, в результате охлаждаемый элемент в течение некоторого периода времени охлаждается, затем начинает нагреваться. После выключения управляющего напряжения и, соответственно, в отсутствие отрицательной люминесценции скорость возрастания температуры охлаждаемого элемента тем больше, чем больше амплитуда или длительность импульса напряжения.

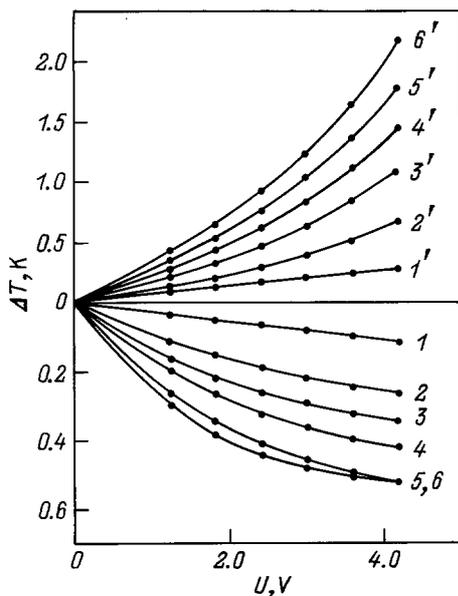


Рис. 3. Экспериментальная полевая зависимость температуры охлаждения (1–6) и нагревания (1'–6') охлаждаемого элемента при различных длительностях импульсов люминесценции, мс: 1, 1' — 30; 2, 2' — 100; 3, 3' — 200; 4, 4' — 300; 5, 5' — 400; 6, 6' — 500. $H = 20 \text{ кЭ}$, охлаждающий элемент — InSb.

При использованных значениях управляющих полей мощность люминесценции зависит от напряжения U линейно. В случае коротких импульсов ($t_i \ll \tau$) из (3) следует, что $\Delta T \approx -Wt_i$, т.е. не зависит от параметра нагрева охлаждающего элемента τ_s и ΔT линейно увеличивается с ростом напряжения, что и наблюдается в эксперименте (рис. 3, кривые 1, 1'). Для длинных импульсов $\Delta T(t)$ достигает минимума при $t_{\min} < t_i$ (см. нижние кривые на рис. 1, б или 2, б). Из (3) находим, что ΔT_{\min} определяется выражением

$$\frac{\Delta T_{\min}}{T_0} = -\frac{\tau}{\tau_s} \left(\frac{W\tau_s}{T_0} - \ln \left(1 + \frac{W\tau_s}{T_0} \right) \right). \quad (5)$$

Отсюда при $W\tau_s/T_0 \ll 1$ получаем

$$\Delta T_{\min} \approx -W^2\tau_s\tau/2T_0. \quad (6)$$

Таким образом, при $W \sim U$ и $\tau_s \sim U^{-2}$ зависимость $\Delta T_{\min}(U)$ стремится к насыщению. Тенденция к этому видна на кривых 5, 6 (рис. 3), которые соответствуют самым длинным импульсам.

Длительность и амплитуду управляющего импульса можно подобрать таким образом, чтобы после выключения напряжения температура охлажденного элемента

не поднималась выше равновесного значения (рис. 1, *a*). Последнее обстоятельство весьма важно в случае практического применения описываемого эффекта.

Как выяснилось, ход полевых зависимостей ЭРО примерно одинаков для использованных в качестве охладителей кристаллов InSb и CdHgTe, максимальные же значения ΔT существенно отличаются. Наибольшее понижение температуры охлаждаемого элемента наблюдается в случае использования в качестве активного элемента кристалла CdHgTe ($E_g \simeq 0.14$ эВ) и составляет величину 0.62 К. Несколько меньшие значения ΔT_{\min} , полученные нами из теоретических расчетов (рис. 2, *b*), могут быть связаны с тем, что в теории не учитывалось влияние фильтра на радиационный обмен и теплоотвод через металлические контакты-держатели.

Проведенные исследования показывают возможность практического применения ЭРО. Важным является то обстоятельство, что в данной ситуации активный полупроводниковый элемент в зависимости от полярности управляющего напряжения может выступать в роли как охладителя, так и нагревателя (см. рис. 3). Это особенно существенно при использовании его в качестве активного элемента устройства стабилизации температуры. Такое устройство нами было создано и успешно применено для стабилизации частоты малогабаритного кварцевого генератора. Анализ работы устройства показывает его преимущества по сравнению с аналогами (например, термоэлектрическими), обусловленные малой инерционностью включения и выключения активного элемента. Отметим, что для улучшения технических параметров указанного устройства, особенно для уменьшения времени радиационного воздействия на контролируемый объект, необходимо в качестве охлаждающих элементов использовать тонкие (большое сопротивление) полупроводниковые пленки, изготовленные из узкозонных материалов.

Список литературы

- [1] С.С. Болгов, В.К. Малютенко, В.И. Пипа. Письма ЖТФ, **5**, 1444 (1979).
- [2] С.С. Болгов, В.К. Малютенко, В.И. Пипа. ФТП, **17**, 208 (1983).
- [3] P. Berdahl. Proc. 18th Int. Conf. on Phys. of Semicond. (Stockholm, 1986) p. 1595.
- [4] V.K. Maluyutenko. Semicond. Sci. Technol., **8**, S390 (1993).
- [5] В.И. Пипа. ФТП, **29**, 526 (1995).
- [6] В.Ф. Косоротов, Л.С. Кременчугский, В.Б. Самойлов, Л.В. Щедрина. Пироэлектрический эффект и его практические применения (Киев, Наук. думка, 1989).
- [7] *Акустические кристаллы*, под ред. М.П. Шаскольской (М., Наука, 1982).

Редактор В.В. Чалдышев

Radiative cooling under the magneto-concentration effect

A.I. Liptuga, V.K. Maluyutenko, V.I. Pipa, and L.V. Levash*

Institute of Semiconductor Physics, Ukrainian Academy of Sciences, 252650 Kiev, the Ukraine

*Institute of Physics, Ukrainian Academy of Sciences, 252028 Kiev, the Ukraine

Abstract The paper presents theoretical and experimental results obtained for time dependencies of the radiation cooling effect induced by a pulse semiconductor source of negative interband luminescence. The kinetics of cooling and subsequent temperature relaxation of the passive element depending on the luminescence pulse power and duration has been studied. It is shown that the method of luminescence excitation (magneto-concentration effect) makes it possible to perform both radiation cooling and heating of the passive element, which is attractive for practical use. The theoretical results correspond qualitatively to experimental data. The maximum cooling achieved experimentally at room temperature is 0.62 K.