

Локальная неустойчивость диэлектрического отклика кристаллов CdZnTe

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Введение

Для кристаллов $A^{II}B^{VI}$, выращенных в существенно неравновесных условиях, характерно многообразие типов и масштабов структурных неоднородностей с различной степенью упорядоченности. Их взаимосвязи формируются при росте и эволюционируют под воздействием внешних факторов, являются источником эмерджентных свойств кристаллов, которые проявляются наиболее ярко в экстремальных условиях. При этом упорядоченные совокупности структурных дефектов (границы вюрцит-сфалерит, полисинтетические двойники и т. п.) обуславливают появление высоковольтной фотоЭДС, аномальной фотополяризованности [1], сенсibilизированную фотопроводимость [2] и т.п., а неупорядоченные – зачастую становятся локальными источниками диссипации, неустойчивости и нелинейности характеристик материалов [3-5]. Это указывает на то, что зарождение и эволюция потенциальных источников неустойчивости определяются характером взаимосвязей совокупностей дефектов структуры и их влиянием на энергетический спектр и напряженно-деформированное состояние кристаллов. Однако в настоящее время проблемы выявления таких взаимосвязей связаны с низкой эффективностью известных методов диагностики кристаллических материалов, практическим отсутствием характеристических признаков, критериев и интегральных показателей. В этом отношении перспективны диэлектрические методы исследования, что обусловлено сильным влиянием на диэлектрический отклик перестройки упругой и электрической подсистем в пьезоэлектрических кристаллах $A^{II}B^{VI}$. Однако решение задачи выявления потенциальных источников неустойчивости в материалах требует повышения чувствительности диэлектрических методов путем увеличения частоты дискретизации отклика, использования современной элементной базы, а также современных информационных технологий на всех этапах исследования. Поэтому целью данной работы являлась разработка информационно-измерительного комплекса для диэлектрических исследований и изучения устойчивости диэлектрических характеристик кристаллических материалов $A^{II}B^{VI}$ на низких и инфранизких частотах.

Результаты эксперимента и обсуждение

Для измерения статической диэлектрической проницаемости широко применяют метод Фурье-спектроскопии [6]. Но он требует сложной математической обработки сигнала отклика материала и не обеспечивает пространственной локальности измерений. Недостатком существующих методов Q-метрии исследования диэлектрического отклика материалов является также их низкая точность. Кроме того, они не обладают широкополосностью. Этим недостаткам в значительной степени лишены методы, основанные на прямом измерении реальной и мнимой частей комплексного сопротивления материалов [7-9]. Существуют интегральные микросхемы для их реализации, например 12-разрядный преобразова-

тель импеданса и анализатор цепей AD5934 (Analog Devices). Однако они не позволяют измерять импеданс более 10 МОм. Этим недостатков лишено разработанное нами устройство для измерения реальной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости высокоомных кристаллов $A^{II}B^{VI}$ (рис. 1).

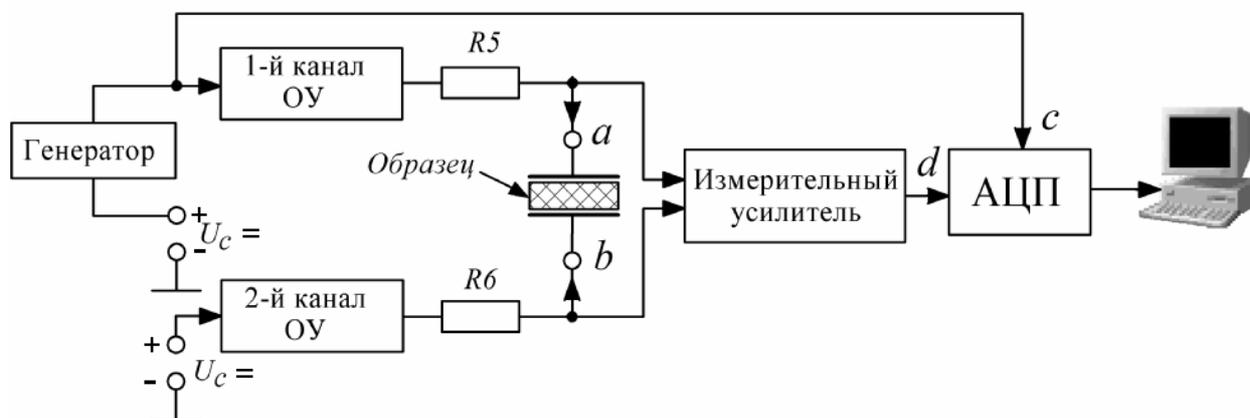


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса для исследования диэлектрического отклика кристаллов $A^{II}B^{VI}$

Сигнал от генератора гармонического сигнала, содержащий постоянную составляющую U_c , усиливается первым каналом высоковольтного операционного усилителя КР1443УД1 и через резистор R_5 подается на измерительную ячейку. Вместе с тем второй канал усилителя предназначен для формирования только постоянного напряжения на резисторе R_6 , которое вычитается из выходного напряжения первого канала. Токозадающие резисторы R_5 и R_6 в совокупности с комплексным сопротивлением измерительной ячейки \dot{Z} образуют частотно-зависимый делитель напряжения с коэффициентом передачи \dot{K} , определяемым следующим соотношением:

$$\dot{K} = \frac{\dot{Z}}{\dot{Z} + R_5 + R_6} = \frac{R_0 - \frac{j}{\omega C_0}}{R_0 - \frac{j}{\omega C_0} + R_5 + R_6}. \quad (1)$$

В этом выражении R_0 представляет собой реальную часть комплексного сопротивления измерительной ячейки, включающую в себя активное сопротивление образца и сопротивление соединительных проводов, а $C_0 = C_{обр} + C_2 + C_{пр}$, где $C_{обр}$ – емкость образца, C_2 – геометрическая емкость, $C_{пр}$ – емкость соединительных проводов. Резисторы R_5 , R_6 являются токозадающими, и при выполнении условия $(R_5 + R_6) \gg |\dot{Z}|$ модуль комплексного сопротивления измерительной ячейки определяется законом Ома.

Мнимая часть комплексного сопротивления $\text{Im} \dot{Z}$ кристалла пропорциональна фазовому сдвигу $\Delta\varphi$ (2) между входным гармоническим сигналом и откликом образца, измерение которого проводится путем преобразования искомого фазового сдвига $\Delta\varphi$ в интервал времени Δt с помощью таймеров микроконвертера ADuC814 (Analog Devices). Данный микроконвертер также выполняет аналого-цифровое преобразование измеряемых сигналов и передачу данных в компьютер по интерфейсу RS-232, где с помощью оригинального программного обеспечения вначале определяется фазовый сдвиг (3), а затем емкость (4) и тангенс (5) измерительной ячейки:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \pi \frac{\Delta t}{T}, \quad (2)$$

где Δt – временной сдвиг между входным сигналом и откликом кристалла;
 T – период счетных импульсов.

$$C_o = \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{\text{tg}^2 \varphi + 1}}}{\omega \cdot |Z|}; \quad (3)$$

$$\text{tg} \delta = \frac{1}{\omega \cdot C_o \cdot (R5 + R6)}. \quad (4)$$

Измерительный усилитель предназначен для согласования входного сопротивления аналого-цифрового преобразователя микроконтроллера ADuC814 с сопротивлением измерительной ячейки. Низкочастотный преобразователь емкости измерительной ячейки в напряжение (рис. 2) выполнен на базе двух каналов высоковольтного операционного усилителя КР1443УД1. Ко входу первого канала микросхемы DA1, включенного по неинвертирующей схеме, приложен сигнал от генератора гармонического напряжения. Более того, к нему добавляется постоянная составляющая тока, необходимая для смещения рабочей точки ОУ на середину линейного участка его передаточной характеристики. При этом выходное напряжение усилителя также содержит постоянную составляющую величиной 150 В. Именно для ее компенсации предназначен второй канал DA1.2 ОУ, который работает как усилитель постоянного тока и на выходе формирует постоянное напряжение такой же величины. Это напряжение обуславливает ток через резистор R6 и измерительную ячейку в противоположном направлении, вычитающийся из тока, создаваемого первым каналом ОУ. При этом наиболее полная компенсация его постоянной составляющей достигается при равенстве коэффициентов усиления первого и второго каналов операционного усилителя, т. е. при выполнении условия $\frac{R3}{R1} = \frac{R4}{R2}$. В результате на измерительной ячейке формируется переменное напряжение, которое через буферные ОУ DA2.1 и DA2.2 подается на дифференциальный усилитель DA2.3. Он, как и буферные каскады, выполнен на операционном усилителе AD820 (Analog Devices), который характеризуется высоким входным сопротивлением (10^{13} Ом) и низким входным током (0,5 нА). Дифференциальный каскад формирует однополюсное напряжение, которое затем поступает на вход масштабирующего усилителя АЦП, а также подавляет оставшуюся синфазную составляющую. В результате отпадает необходимость того, чтобы выходной

ОУ имел большой коэффициент ослабления синфазной составляющей, и не требуется прецизионного согласования номиналов резисторов в цепи обратной связи.

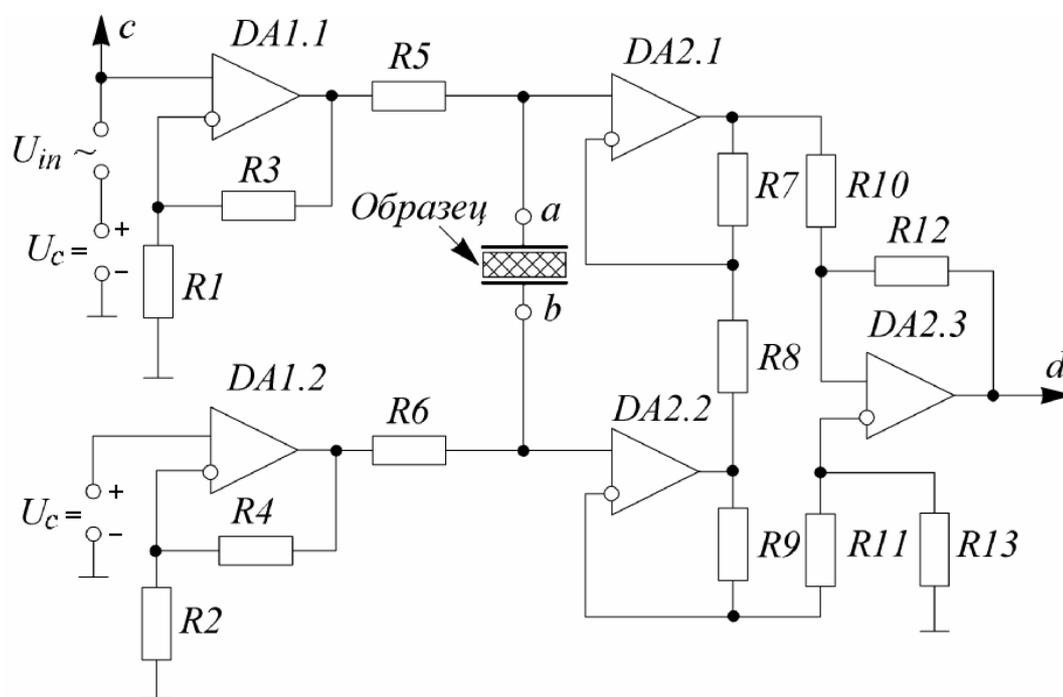


Рис.2. Принципиальная схема низкочастотного преобразователя емкости в электрический сигнал

На описанной установке были проведены исследования зависимостей диэлектрических параметров кристаллов CdZnTe от длины волны и интенсивности фотовозбуждения в диапазоне частот 0,1...1 кГц. В результате было установлено, что темновые значения реальной ε' и мнимой ε'' частей комплексной диэлектрической проницаемости составляют $\varepsilon' = 18...22$ и $\varepsilon'' = 1...3$. Эти значения хорошо согласуются с данными, полученными с помощью стандартного измерительного моста переменного тока RLC-819 [10, 11]. В результате исследований было установлено, что для образцов, содержащих разнообразные границы, создаваемые двумерными дефектами структуры (двойниками, блоками, полосами скольжения и т.п.), спектры $\varepsilon' = f(\lambda)$ и $\varepsilon'' = f(\lambda)$, а также построенные на их основе диаграммы $\varepsilon'' = f(\varepsilon')$, отличаются друг от друга и зависят от направления сканирования по шкале длин волн. Кроме того, они также зависят от скорости изменения длин волн и фотоактивной или электрической предыстории, т.е. от времени пребывания образцов до измерения на свету или в электрическом поле.

Выявленные индивидуальные особенности спектров диэлектрического фототоклика естественно связать с особенностями эволюцией характера взаимодействия структурных неоднородностей различного масштаба под влиянием внешних факторов. На это также указывает зависимость спектров $\varepsilon' = f(\lambda)$ и $\varepsilon'' = f(\lambda)$ от времени их сканирования, т.е. от скорости изменения длины волны, а также характера изменения кинетики фототока с увеличением интенсивности фо-

товозбуждения. При циклическом сканировании на некоторых образцах была выявлена плохая воспроизводимость кривых $\varepsilon' = f(\lambda)$ и $\varepsilon'' = f(\lambda)$ в некоторых диапазонах длин волн. Она сопровождается возникновением изломов на спектральных зависимостях реальной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, установить четкие границы которых в большинстве случаев оказалось затруднительным. Однако они становятся вполне различимыми, если провести компьютерную обработку результатов измерений методом численного дифференцирования, а затем представить исходные зависимости в виде диаграмм $d\varepsilon'/d\lambda = f(\varepsilon')$ и $d\varepsilon''/d\lambda = f(\varepsilon'')$ (рис. 3).

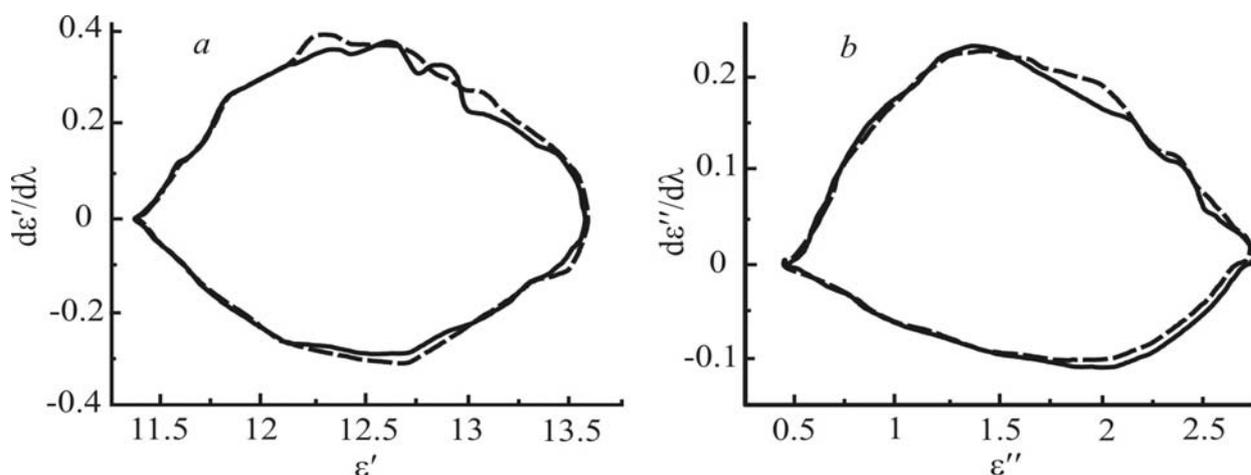


Рис. 3. Диаграммы $d\varepsilon'/d\lambda = f(\varepsilon')$ (a) и $d\varepsilon''/d\lambda = f(\varepsilon'')$ (b) кристалла CdZnTe, содержащие разномасштабные структурные неоднородности. Сплошная линия – сканирование спектра при увеличении длины волны, штриховая – при уменьшении длины волны

Такие диаграммы представляют собой спектры реальной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости в параметрическом виде и содержат последовательность дугообразных участков. На диаграммах $d\varepsilon'/d\lambda = f(\varepsilon')$ и $d\varepsilon''/d\lambda = f(\varepsilon'')$, полученных при последовательном измерении спектров одного и того же образца в одинаковых условиях, отчетливо выявляются границы спектральных участков неустойчивого фотоотклика, на которых наблюдается плохая воспроизводимость, а также все особенности отклика кристалла, связанные с изменением скорости сканирования и фотоактивной или электрической предыстории. Действительно, с увеличением скорости сканирования длин волн на одних образцах было обнаружено увеличением числа дугообразных участков, а на других – наоборот, их уменьшение. Это подтверждает предположение об изменении характера взаимодействия структурных неоднородностей. Поскольку в первом случае, очевидно, начинают доминировать их крупномасштабные совокупности, а во втором – мелкомасштабные.

Следует отметить, однако, что в этом случае возникает неоднозначность при классификации кристаллов по уровню устойчивости, поскольку диаграммы

$d\varepsilon'/d\lambda = f(\varepsilon')$ и $d\varepsilon''/d\lambda = f(\varepsilon'')$ с разных сторон характеризуют диэлектрический отклик сенсора.

Действительно, оказалось, что неустойчивости его поляризационной и диссипативной составляющих могут проявляться в различных диапазонах длин волн. Поэтому для исследования и анализа устойчивости фотоотклика конкретного детектора к внешним факторам нами предложены диаграммы $d\varepsilon''/d\lambda = f(d\varepsilon'/d\lambda)$ (рис. 4).

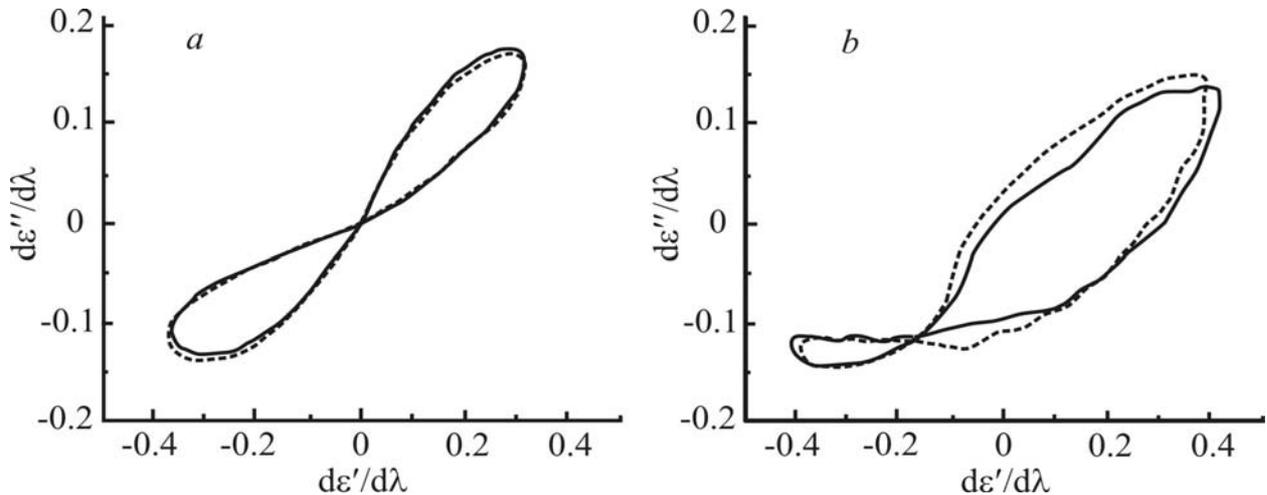


Рис. 4. Диаграммы $d\varepsilon''/d\lambda = f(d\varepsilon'/d\lambda)$ кристалла CdZnTe: *a* – однородный кристалл; *b* – кристалл, содержащий разномасштабные структурные неоднородности различного типа и масштаба. Сплошная линия – сканирование спектра в направлении увеличения длины волн, штриховая – при уменьшении длины волн

Совокупности таких диаграмм, полученных при прямом и обратном направлении сканирования спектра, позволяют отчетливо выявлять границы нестабильных участков. Оказалось, что для наиболее однородных образцов диаграммы $d\varepsilon''/d\lambda = f(d\varepsilon'/d\lambda)$ симметричны относительно начала координат, площади их петлеобразных участков практически одинаковы (рис. 4, *a*) и они не содержат неустойчивых областей. Увеличение же интенсивности излучения приводит к увеличению площадей обоих петлеобразных участков, но их симметрия не нарушается. В то же время для кристаллов, содержащих разнообразные границы, создаваемые двумерными дефектами структуры (двойниками, блоками, полосами скольжения и т.п.) характерна асимметрия этих диаграмм относительно начала координат (рис. 4, *b*). При этом увеличение интенсивности излучения ведет не только к возрастанию числа нестабильных участков, но и к смещению точки деления диаграмм $d\varepsilon''/d\lambda = f(d\varepsilon'/d\lambda)$ на два петлеобразных участка. Это сопровождается увеличением площади верхнего и ее уменьшением для нижнего петлеобразного участка.

Кроме того, экспериментально было установлено, что предложенные диаграммы очень чувствительны к изменению температуры. Действительно, увеличение температуры приводит к повороту диаграмм $d\varepsilon''/d\lambda = f(d\varepsilon'/d\lambda)$ по часовой стрелке на определенный угол, который зависит от температуры. При этом проис-

ходит также перераспределение площади диаграммы между ее нижним и верхним петлеобразными участками.

Заключение

Таким образом, в работе показано, что диаграммы $d\varepsilon''/d\lambda = f(d\varepsilon'/d\lambda)$, построенные на основе спектральных зависимостей реальной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости, отличаются площадью, числом дугообразных участков и числом спектрально нестабильных участков. Анализ изменений их вида в процессе эксплуатации фотоприемников на основе кристаллов CdZnTe позволяет осуществлять контроль обратимых и необратимых изменений функциональных характеристик сенсоров, так как диаграммы $d\varepsilon''/d\lambda = f(d\varepsilon'/d\lambda)$ дают возможность: а) четко определять спектральные границы неустойчивости диэлектрического отклика; б) количественно оценивать скорость необратимых изменений по соотношению площадей соответствующих петлеобразных участков диаграмм; в) выявлять индивидуальные особенности диэлектрического отклика.

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Украины.

Список литературы

1. Мигаль В.П., Рвачев А.Л., Чугай О.Н. Релаксационная поляризация в кристаллах ZnS_xSe_x при фотовозбуждении // Физика и техника полупроводников.– 1985.– Т.19.- №8. – С.1517-1519.
2. Gavrikova I.G., Mygal V.P., Rvachev A.L. Optical Sensitization of the Photoconductivity Bands // Phys. Stat. Sol.(a). – 976.- №37.- P. 21-24.
3. Мигаль В.П., Фомин А.С. Многомасштабность спектрального и пространственного фотооткликов кристаллов CdZnTe // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т.32. – №11. – С. 44-51.
4. Мигаль В.П., Клименко И.А., Фомин А.С. Динамические состояния полупроводниковых сенсоров // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – X. 2004. – Вып. 23. – С. 63-66.
5. Устойчивость фотоотклика кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ / В.К. Комарь, В.П. Мигаль, С.В. Сулима, А.С. Фомин // Физика и техника полупроводников. – 2006. – Т.40. – Вып. 2. – С. 133-135.
6. Эме Ф. Диэлектрические измерения. – М.: Химия, 1967. – 223 с.
7. Белов А.А., Хвостиков В.А. Широкополосный диэлектрический спектрометр // Приборы и техника эксперимента. – 1984. – № 4. – С. 123-124.
8. Киселев В. И., Султанаев Р. М. Устройство для измерения диэлектрических свойств на низких и инфранизких частотах // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 2. – С. 190-193.
9. Киселев В. И., Султанаев Р. М. Устройство для определения диэлектрических параметров материалов на низких и высоких частотах // Приборы и техника эксперимента. – 1991. – № 3. – С. 172-176.
10. Клименко И. А., Мигаль В. П. Обобщенный характер диэлектрического отклика кристаллов CdTe, выращенных из расплава // Физика и техника полупроводников. – 2002. – Т. 36. – Вып. №4. – С. 397-400.
11. Влияние упругих полей ростовых дефектов на фотодиэлектрический отклик кристаллов $Cd_{1-x}Zn_xTe$ / И.А. Клименко, В.К. Комарь, В.П. Мигаль, Д.П. Наливайко // Физика и техника полупроводников. – 2001. – Т. 35. – №2. – С. 139-142.