

Фазовая аподизация кристаллоподобных структур

© Е.А. Нелин

Киевский политехнический институт,
03056 Киев, Украина
e-mail: ye_nelin@rtf.ntu-kpi.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 9 ноября 2005 г.)

Предложен метод повышения избирательности кристаллоподобных структур (полупроводниковых сверхрешеток, фотонных и фононных кристаллов) фазовой аподизацией. Приведены характеристики, иллюстрирующие эффективность метода.

PACS: 81.05-t

Кристаллоподобные структуры, КС (полупроводниковые сверхрешетки, фотонные и фононные кристаллы), позволяют существенно улучшить параметры различных устройств обработки сигналов. Для высокоэффективных устройств на основе КС необходимы структуры с высокой избирательностью, достигаемой вариацией параметров ячеек КС — аподизацией.

При формировании характеристик различных многоэлементных структур преимущественное применение получила амплитудная аподизация. В [1] рассмотрена амплитудная аподизация фотонных кристаллов радиодиапазона как модели более сложных оптических кристаллов. Для амплитудной аподизации КС необходимо выполнить вариацию волновых свойств ячеек, что представляет значительные конструктивные и технологические трудности. Например, в случае фононных кристаллов в широких пределах должны изменяться упругие параметры ячеек. При фазовой аподизации исходная периодичность волновых свойств сохраняется, что существенно упрощает технические требования. Однако необходимо учесть ухудшение потенциальной избирательности по сравнению с амплитудной аподизацией за счет частотной зависимости фазового взвешивания.

В настоящей работе предложен эффективный метод высокоизбирательной фазовой аподизации. Рассмотренные варианты отличаются техническими требованиями и особенностями спектральных характеристик.

Формирование запрещенных зон в КС так же, как в фотонных кристаллах [2], можно рассматривать как синергетическое взаимодействие двух механизмов резонансного отражения — микроскопического отражения от отдельной ячейки КС и макроскопического от всей КС. Управление этим взаимодействием позволит сформировать требуемые характеристики отражения и прохождения КС.

Отраженные волны вызваны различием волновых свойств областей КС, характеризуемых волновыми импедансами. Отношение $r_z = Z_1/Z_2$, где $Z_{1,2}$ — импедансы областей КС, определяет локальный коэффициент отражения $r = (r_z - 1)/(r_z + 1)$. Величина r_z и расположение локальных отражателей определяют спектральные характеристики КС [3], принципиальные особенности которых проявляются в одномерных структурах. Величина r прямо пропорциональна весовому

коэффициенту локального отражателя при амплитудной аподизации. В [4] на основе амплитудного формирования характеристики отражения ячейки КС предложена краевая амплитудная аподизация КС.

Фазовая аподизация основана на фазовом формировании эффективности вклада ячейки в общую характеристику, она сложнее краевой, поскольку распределена по всей структуре. Однако большая степень взвешивания позволит сформировать и более избирательные характеристики.

Фазовое формирование весового коэффициента ячейки КС выполняется смещением локальных отражателей из эквидистантных положений. При реализации такой аподизации должны быть учтены следующие особенности: 1) для высокоизбирательных характеристик необходим широкий диапазон весовых коэффициентов; 2) реализуемые весовые коэффициенты частотно-зависимы; 3) размеры ячейки имеют минимально допустимые конструктивно-технологические ограничения.

Эти особенности учтены в предлагаемых вариантах фазовой аподизации (рис. 1), рассмотренных на примере одномерной КС. В вариантах *a* и *b* весовой коэффициент реализован двумя отражателями, *c* — тремя границами

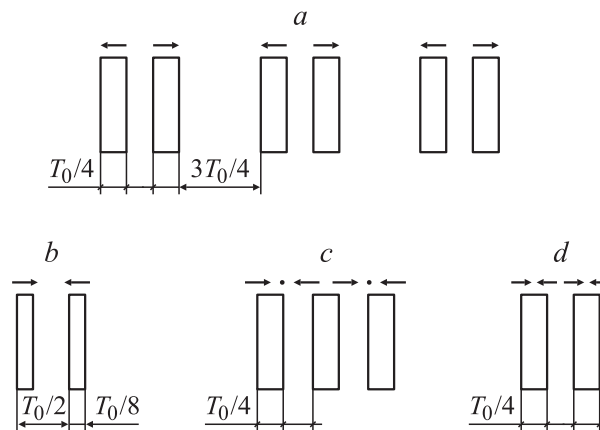


Рис. 1. Варианты фазовой аподизации. T_0 — временной период волны на средней частоте f_0 первой запрещенной зоны. Направление смещения отражателя или его границы показано стрелкой. Точка соответствует несмещаемой границе отражателя.

отражателей, в d — двумя границами. Для компенсации частотной зависимости весовых коэффициентов смещения смежных отражателей или границ отражателей чередуются по направлению. Максимальный коэффициент отражения обеспечивают варианты c и d , минимальному (нулевому) весовому коэффициенту в вариантах a, b и d соответствуют смещения, равные $T_0/8$, в варианте c — $T_0/6$. При этом минимальные размеры элементов в вариантах $a-d$ определяются величинами $T_0/4, T_0/8, T_0/12$ и 0 соответственно. Наиболее высокой потенциальной избирательностью обладает вариант d . Ближайшие гармонические отклики, ограничивающие полосы подавления отражений, расположены на частотах соответственно $2f_0/3, f_0/2, f_0/3, 0$ и $4f_0/3, 3f_0/2, 5f_0/3, 2f_0$.

На рис. 2 приведены частотные зависимости коэффициента отражения (по модулю) КС без аподизации и с фазовой аподизацией по варианту c . Весовая функция — $f_m = \exp\{-[12(m - 0.5)/(N - 2)]^3\}$, $m = 1, 2, \dots, (N + 1)/6$. Для выравнивания уровня пульсаций в разрешенных зонах (уровня боковых лепестков характеристики) смещения рассчитаны на частоте $F = 1.075$.

На рис. 3 приведены частотные зависимости коэффициента отражения КС без аподизации и с фазовой аподизацией по варианту d . Весовая функция — $f_m = \exp\{-[4(m - 0.5)/N]^{2.4}\}$, $m = 1, 2, \dots, (N + 1)/2$. Для повышения точности реализации весовой функции смещения рассчитаны относительно середины КС. Фазовая аподизация обеспечивает избирательность, близкую к амплитудной.

Приведенные на рис. 4 зависимости иллюстрируют повышение эффективности прохождения электронов в среду с потенциальной ступенькой за счет аподизованной сверхрешетки (СР), размещенной перед ступенькой. Аподизация выполнена по варианту d относительно

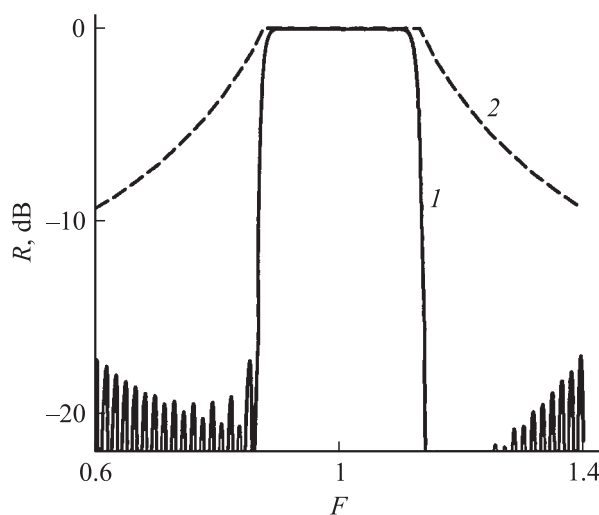


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения R одномерной КС с фазовой аподизацией по варианту c (1) и без аподизации (2, показана огибающая боковых лепестков); $F = f/f_0$. Число слоев КС $N = 119, r_z = 1.5$.

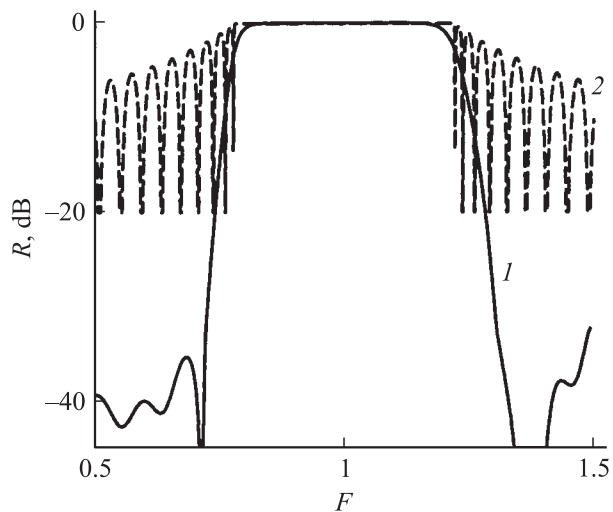


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения КС с фазовой аподизацией по варианту d (1) и без аподизации (2); $N = 39, r_z = 2$.

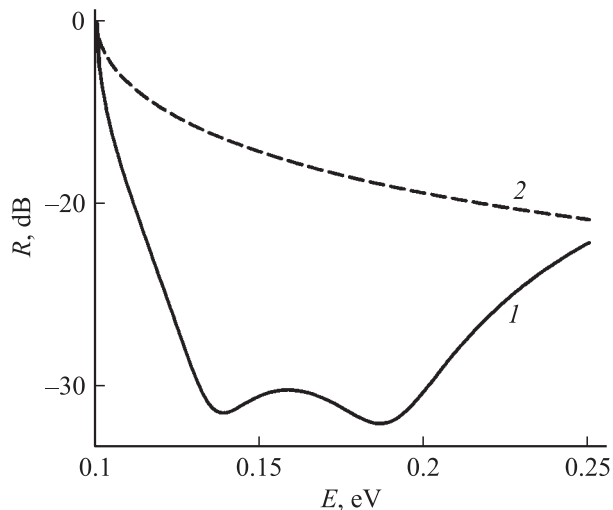


Рис. 4. Зависимости коэффициента отражения от потенциальной ступеньки с аподизованной СР (1) и без СР (2) от энергии электрона E .

середины СР. Величина смещения m -й границы слоев СР Δx_m определяется весовым коэффициентом h_m : $\Delta x_m = (d/2\pi) \arccos h_m$, $m = 1, 2, \dots, N/2$, где d — период исходной неаподизованной СР с одинаковой толщиной слоев. Весовые коэффициенты равны 0.7, 0.4, 0.2. Число барьеров — 3 ($N = 6$), высота барьеров равна высоте ступеньки и составляет 0.1 eV. Эффективная масса электрона в области барьера $m_1 = 0.1m_0$, в области ямы $m_2 = 0.09m_0$, где m_0 — масса покоя электрона. Толщина монослоя $a = 3 \text{ \AA}$, $d = 40 \text{ \AA}$. С учетом ограничений практической реализуемости полученные значения толщины слоев ограничены целыми числами, кратными a . Для оптимизации характеристики толщина

второго и пятого слоев уменьшена на a . Аподизованная СР существенно повышает эффективность прохождения электронов. Для моделирования КС использована модель [5].

Фазовая аподизация обеспечивает формирование высокоизбирательных характеристик КС, что имеет первостепенное значение для высокоэффективных, технологичных устройств на основе КС.

Список литературы

- [1] *Erro M.J., Laso M.A.G., Lopetegi T. et al.* // Fiber and Integrated Optics. 2000. Vol. 19. N 4. P. 311–325.
- [2] *Sajeev J., Busch K., Toader O.* Encyclopedia of Physical Science and Technology. New York: Academic Press, 2001. Vol. 12. P. 133–145.
- [3] *Нелин Е.А.* // ЖТФ. 2004. Т. 74. Вып. 11. С. 70–74.
- [4] *Нелин Е.А.* // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 11. С. 120–121.
- [5] *Cristopoulos C.* The Transmission-Line Modeling Method: TLM. New York: IEEE Press / Oxford University Press, 1995. 232 p.