

Матричный лазерный преобразователь ИК изображения в видимое

Н.И.Липатов, А.С.Бирюков

Предложен новый тип фокального матричного преобразователя ИК изображения в видимое. Пикселями-приемниками ИК излучения матрицы являются перестраиваемые микрорезонаторы вертикальных излучающих полупроводниковых микроструктур VCSEL-типа. Конверсия изображения осуществляется в результате смещений глухих зеркал резонаторов, обусловленных термоупругими напряжениями в их микроподвесках вследствие поглощения ИК излучения. Анализ возможностей преобразователя показывает, что его чувствительность составляет $10^{-3} - 10^{-2}$ К, а быстродействие равно $10^{-4} - 10^{-3}$ с. Эти характеристики определяют практическую пригодность преобразователя.

Ключевые слова: матричный преобразователь инфракрасного изображения, микроподвеска зеркала резонатора, полупроводниковый лазер видимого диапазона.

Известно [1], что в полной темноте глаз человека не может видеть объект, температура которого ниже 700 К. В то же время использование преобразователя теплового (ИК) изображения в видимое позволяет наблюдать невидимый глазом объект и анализировать его состояние. Такое преобразование дает возможность более полно использовать информационный потенциал ИК диапазона, не уступающий по информационной плотности видимому диапазону при дневной освещенности [2].

Наметившиеся за последнее десятилетие направления развития преобразователей ИК изображения, в частности повышение их чувствительности до 10^{-3} К, могут привести к качественному переходу, а именно, от наблюдения источников ИК излучения к возможности видеть их в ИК лучах с высокой информативностью.

К настоящему времени предложено и реализовано множество способов преобразования теплового изображения в видимое. Тем не менее исследования в этой области становятся все более интенсивными, что обусловлено по крайней мере двумя обстоятельствами – существенным расширением области практического использования ИК диапазона и значительными успехами в микромашиной технологии тонкопленочных структур.

Все известные преобразователи условно можно разделить на две группы. К первой отнесем те, в которых имеет место преобразование ИК излучения в электрический ток, например различные тепловые приемники [3]. Во вторую группу входят преобразователи, в которых, в принципе, происходит ап-конверсия электромагнитного излучения, т. е. преобразование ИК излучения в видимое, минуя этап генерации электрического тока. Примером такой конверсии может служить, например, жидкокристаллический преобразователь [1].

Следует отметить, что в настоящее время самые зна-

чительные успехи достигнуты в разработке преобразователей первой группы, вызывающих наибольший интерес. К ним относятся, прежде всего, неохлаждаемые микроболометрические матрицы (см. обзор [4]), а также фокальные мультиплексоры, пиксели-приемники ИК излучения которых являются емкостными датчиками [5]. Этот интерес обусловлен как высоким уровнем развития технологии изготовления микроэлектронно-механических элементов, так и ее широкой доступностью. В то же время для развития преобразователей второй группы требуется более комплексная технология, а именно, микроэлектронно-оптико-механическая, которая пока не является столь доступной.

Таким образом, результаты, полученные в данной работе, могут стимулировать более широкое распространение этой комплексной технологии, в частности в плане разработки и изготовления различных преобразователей второй группы.

Независимо от принадлежности к той или иной группе любой преобразователь ИК изображения содержит соответствующую оптическую систему, задача которой – формировать в интересующей области ИК спектра изображение, например на фокальной матрице, пиксели которой могут служить приемниками ИК излучения. Как правило, пиксель-приемник имеет тонкий слой, поглощающий ИК излучение, и чувствительный элемент, находящийся в тепловом контакте с этим слоем. При поглощении ИК излучения температура чувствительного элемента изменяется, в результате чего изменяются параметры элемента или его свойства. Это позволяет при наличии соответствующей схемы опроса состояния пикселей осуществлять процесс преобразования изображения.

В настоящей работе рассматривается матричный преобразователь второй группы, в котором в качестве пикселя-приемника используется многослойная полупроводниковая лазерная структура VCSEL (Vertical-Cavity Surface Emitting Laser) [6], способная генерировать излучение видимого диапазона. В этом случае роль чувствительного элемента, как будет видно из дальнейшего, может играть резонатор такого лазера. Его выходное полу-

Н.И.Липатов, А.С.Бирюков. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e mail: biriukov@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 16 ноября 2005 г., после доработки – 23 января 2006 г.

прозрачное зеркало представляет собой многослойный брэгговский отражатель с максимумом отражения на длине волны λ_0 . Излучение с такой длиной волны будет формировать видимое монохроматическое изображение невидимого глазом объекта. В качестве глухого подвижного зеркала используется металлическая пленка, нанесенная на биматериальную подвеску консольного или мембранного типа. Подвеска выполнена так, что между границей активной среды лазера и этим зеркалом существует воздушная щель шириной $\Delta \approx \lambda_0$ [7].

Предложение использовать VCSEL-структуру в качестве пикселя матричного конвертора ИК изображения обусловлено следующим. Во-первых, генерация VCSEL-структуры всегда происходит на одной продольной моде, поскольку в этом случае межмодовое расстояние $\Delta\lambda_m \approx \lambda_0^2/[2(nL + \Delta)]$ заметно превышает ширину спектрального контура генерации, равную 10–20 нм (рис.1) (здесь $L \approx 2\lambda_0$ – длина активной среды лазера и n – ее показатель преломления, дисперсией которого для простоты пренебрегаем). При таких условиях изменение ширины щели будет обуславливать смещение линии генерации и, как следствие, контролируемое изменение интенсивности генерируемого излучения. Во-вторых, технология изготовления указанной структуры обеспечивает высокую степень интеграции пиксельных элементов, что привлекательно в плане как обеспечения высокого пространственного разрешения процесса преобразования изображения, так и использования микропроцессорной технологии для управления состоянием пикселей фокального мультиплексора.

Будем считать, что глухое зеркало резонатора – это металлическая пленка (например, из Au или Al), которая

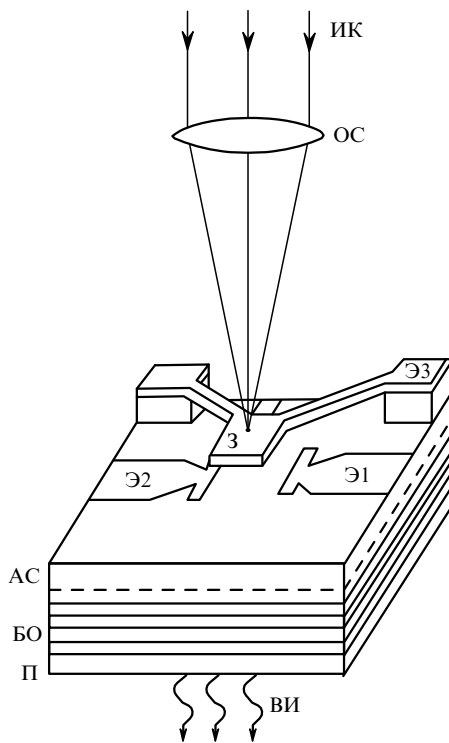


Рис.1. Схема матричного пикселя преобразователя ИК изображения:

П – подложка пикселя; БО – брэгговский отражатель; АС – активная среда лазера; 3 – подвижное зеркало резонатора на консольной подвеске; Э1, Э2 – электроды тока инжекции; Э1, Э3 – электроды подачи напряжения смещения V ; ОС – оптическая система; ИК, ВИ – инфракрасное и видимое излучение.

одновременно является одним из слоев биматериальной подвески. Коэффициент теплового расширения α второго слоя подвески (состоящего, например, из SiN_x или SiO_2) должен существенно отличаться от коэффициента α металлической пленки. В этом случае существует возможность изменять ширину воздушной щели Δ под действием как электростатической силы $F = \epsilon_0 V^2 bl / \Delta^2$ (при подаче напряжения смещения V между металлической пленкой и активной средой лазера), так и термоупругих напряжений, возникающих в биматериальной подвеске вследствие поглощения пленкой ИК излучения. При этом для повышения эффективности поглощения на внешнюю поверхность пленки наносится специальный хорошо поглощающий слой. В приведенном выражении ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума; b и l – геометрические параметры подвески, которые для случая консоли определяют ее ширину и длину соответственно.

Принцип действия предлагаемого преобразователя рассмотрим на примере функционирования одиночного матричного пикселя для подвески консольного типа (см. рис.1).

Пусть изначально напряжение смещения выключено ($V = 0$) и оптический ИК канал перекрыт, т. е. нет потока ИК излучения на подвеску глухого зеркала резонатора, а следовательно, термоупругие напряжения в этой подвеске отсутствуют. При этих условиях инжекционная накачка активной среды обуславливает генерацию VCSEL-структуры на длине волны λ_0 (рис.2).

Если теперь включить напряжение смещения, произойдет сдвиг линии генерации на величину $\Delta\lambda_1 \approx \lambda_0 W_1 \times (nL + \Delta)^{-1}$ (на рис.2 новое положение длины волны обозначено точкой А). Сдвиг обусловлен силой F , под действием которой ширина воздушной щели Δ уменьшается на величину $W_1 \approx Fl^3(1 - \nu^2)/(2t^3bE)$ [8], где E , ν , t – средние (для упрощения задачи) значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона, а также толщина слоев биматериальной подвески соответственно. При изменении напряжения V рабочая точка А может находиться как вблизи области, где интенсивность генерации лазера наиболее чувствительна к ширине щели в резонаторе, так и вблизи порога генерации (при фиксированной мощности инжекционной накачки), что особенно привлекательно в случае подвески мембранного типа.

Если теперь открыть оптический канал, то сформированный оптической системой сигнал ИК излучения мощностью Φ поглотится на тыльной стороне подвижного зеркала. Вследствие этого в биматериальной подве-

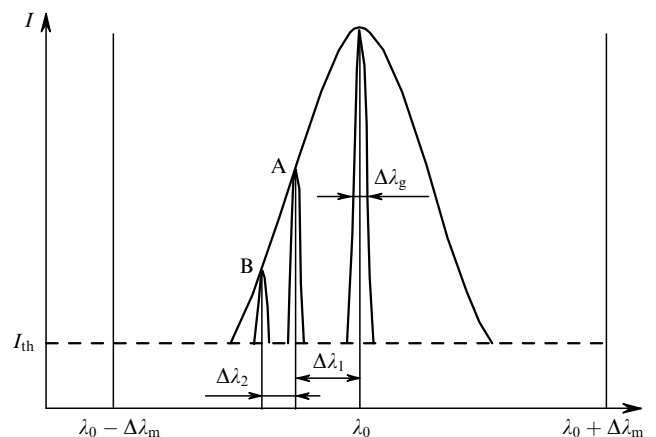


Рис.2. Спектр генерации пикселя VCSEL-структуры.

ске возникнут термоупругие напряжения и произойдет смещение глухого зеркала. Щель в резонаторе уменьшится еще на $W_2 = \Phi K(\alpha_1/\alpha_2, \chi_1/\chi_2, t_1/t_2, b, l)$, а генерируемая мода перейдет из положения А в положение В (рис.2), сместившись по спектру на $\Delta\lambda_2 \approx (\lambda_0 - \Delta\lambda_1)W_2 \times (nL + \Delta)^{-1}$. На выходе пикселя, т.е. VCSEL-структуры, интенсивность излучения генерации соответственно уменьшится. Таким образом, каждый пиксель фокального мультиплексора будет генерировать видимое излучение, интенсивность которого напрямую определится мощностью соответствующего ИК излучения Φ . В итоге на выходной плоскости фокального мультиплексора появится видимое изображение объекта, наблюдение которого осуществляется в ИК диапазоне.

В выражении для W_2 функция K зависит как от совокупности геометрических параметров подвески b, l и t , так и от тепловых характеристик материалов слоев α и χ (χ – теплопроводность). Фактически эта функция определяет фототермический отклик микромеханической подвески глухого зеркала резонатора VCSEL-структуры. При этом максимум K достигается путем выбора как материалов слоев, так и оптимальных значений определяющих K отношений соответствующих параметров. Как следует из [9, 10], в настоящее время в случае консольной подвески функция K составляет 4×10^{-2} м/Вт.

Следует отметить, что если подвеской глухого зеркала служит биматериальная мембрана, преобразованное изображение будет позитивного типа, поскольку термоупругие напряжения в мембранной подвеске обусловят смещение глухого зеркала в направлении, обратном происходящему под действием силы F .

Ограниченный объем работы не позволяет дать полное количественное описание предлагаемого преобразователя. Однако для получения представления о его потенциальных возможностях в плане практической пригодности проведем ряд оценок.

Будем считать, что активная среда ($n = 3.5$) многослойной VCSEL-гетероструктуры выращена из твердого раствора AlGaAs или AlGaAsP, при этом длина волны импульсной генерации $\lambda_0 \approx 650$ нм. Пусть для определенности геометрические параметры консольной подвески глухого зеркала резонатора b и l составляют 8×10^4 и 4×10^4 нм соответственно и пусть именно они определяют размер площадки $S = bl$, на которой происходит полное поглощение потока ИК излучения.

Если в качестве интересующей нас ИК области спектра выбрать, например, традиционный диапазон 8–12 мкм, то для излучения, падающего на площадку пикселя S , получаем $\Phi \approx 6.5 \times 10^{-2} S \sigma T^4 (d/f)^2$ Вт, где σ – постоянная Стефана–Больцмана; d – диаметр входного зрачка; f – фокусное расстояние оптической системы; T – температура удаленного протяженного источника ИК излучения. Для простоты будем считать, что $d/f = 1$ и $T = 300$ К. Тогда для выбранного диапазона наблюдения $\Phi \approx 10^{-7}$ Вт, соответствующее смещение глухого зеркала $W_2 = K\Phi \approx 4$ нм, а смещение генерируемой моды $\Delta\lambda_2 \approx \lambda_0 \times W_2 / (nL + \Delta) \approx 0.5$ нм, что заметно больше спектральной ширины линии генерации $\Delta\lambda_g$, которая, как можно ожидать, составит $10^{-4} - 10^{-3}$ нм.

В принципе смещение линии генерации на $\Delta\lambda_2$ можно считать результатом воздействия фонового ИК излучения с характеристической температурой $T = 300$ К. В этом случае подстройкой напряжения смещения V (уменьшением его для консольной подвески и увеличением

для мембранной) рабочую точку пикселя-приемника можно вернуть в исходное положение А, если необходимо наблюдать объект, температура которого отличается от фоновой на ΔT . При этом, как показывает соответствующая оценка, диапазон изменения напряжения V не превысит 1–2 В.

Наличие объекта с температурой, превышающей фоновую на ΔT , обусловит увеличение мощности излучения Φ , падающего на приемную площадку пикселя S , на величину

$$\Delta\Phi = \frac{S}{4} \left(\frac{d}{f} \right)^2 \left(\frac{\Delta M}{\Delta T} \right)_\Phi \Delta T,$$

где $(\Delta M / \Delta T)_\Phi$ – так называемый температурный контраст, который для выбранного спектрального диапазона 8–12 мкм (при температуре фона 300 К) составляет 2.0 Вт·м⁻²·К⁻¹ [3]. Тогда $\Delta\Phi = 1.6 \times 10^{-9} \Delta T$ Вт·К⁻¹.

Предельно обнаружимое значение ΔT , которое будет определять чувствительность преобразователя, можно оценить исходя из предположения, что термоупругие напряжения в подвеске, вызванные изменением потока на величину $\Delta\Phi$, обуславливают спектральное смещение генерируемой моды на ее ширину, т.е. на $\Delta\lambda_g \approx 10^{-14} - 10^{-13}$ м. Тогда $\Delta T = 0.62 \times 10^9 (\Delta\lambda_g / \lambda_0) (nL + \Delta) / K$, и для выбранных параметров получим $\Delta T = 10^{-3} - 10^{-2}$ К.

Реальное значение ΔT , по-видимому, будет заметно превышать приведенную оценку, поскольку, во-первых, существуют термомеханические шумы подвески, а во-вторых, смещение линии генерации всего лишь на ее ширину вряд ли сможет обеспечить видимому изображению необходимый контраст. Влияние первого обстоятельства можно значительно ослабить вакуумизацией матричного мультиплексора. Влияние второго также можно уменьшить, формируя «высокочастотный» спектральный контур усиления, в частности посредством настройки режима накачки активной среды пикселей.

В приведенном выше описании матричного преобразователя ИК изображения не затронут вопрос о его быстродействии, которое напрямую определяется тепловой временной константой всего пикселя. Если исходить из предположения, что передача тепла от подвески и активной среды пикселя осуществляется исключительно на подложку, то, как показывают оценки, характерное время термомеханической релаксации пикселя составит доли миллисекунды, что вполне пригодно для данного преобразователя, например, в TV-стандарте.

1. Мирошников М.М. *Теоретические основы оптико-электронных приборов* (Л.: Машиностроение, 1983).
2. Таубкин И.И., Трищенко М.А. *Оптический журнал*, (5), 41 (1995).
3. Криксунов Л.З. *Справочник по основам инфракрасной техники* (М.: Сов. радио, 1978).
4. Norton P., Campbell J., Horn S., Reago D. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4130**, 226 (2000).
5. *Infrared Imaging News*, **8** (10) (2002).
6. Yokouchi N., Miyamoto T., et al. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **4**, 701 (1992).
7. Larson M.C. et al. *IEEE Photon. Techn. Lett.*, **7**, 1267 (1995).
8. Roark R.J., Young W.C. *Formulas for Stress and Strain* (New York: McGraw-Hill, 1975).
9. Barnes J.R. et al. *Rev. Sci. Instrum.*, **65**, 3793 (1994).
10. Lai J., Perazzo T., Shi Z., et al. *Sensors and Actuators A*, **58**, 113 (1997).