

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА

Ф.В.Потёмкин, П.М.Михеев

Лаборатория-практикум – «Современные системы автоматизации научных исследований»,
физический факультет и МЛЦ МГУ им. М.В.Ломоносова,
fedpot@rambler.ru, mikheev@phys.msu.ru

В экспериментах связанных с лазерным излучением часто возникает задача характеристики лазерного пучка. Измерение профиля, диаметра, перетяжки пучка, поиска его центра включает в себя определенные трудности по причине фоновой засветки изображения в камере. Создан прибор для измерения в автоматическом режиме качества пучка, профиля излучения и других основных характеристик.

Создан научный стенд для измерения пространственных характеристик лазерного пучка. Основными компонентами системы являются цифровая камера с интерфейсом Firewire, настройка которой осуществляется в LabVIEW с использованием программного модуля IMAQ и IMAQ for Firewire, и система перемещения камеры на базе контроллера шагового двигателя 8SMC1-USB, управляемого из-под LabVIEW с использованием драйверов USB VISA.

С помощью стенда можно измерить:

- профиль пучка в произвольном сечении
- эллиптичность пучка
- длина и радиус перетяжки
- угловая расходимость
- центр масс пучка
- диаметры пучка D_{ox} и D_{oy} .
- параметр качества пучка M^2

Остановимся более подробно на способе измерения каждого из параметров.

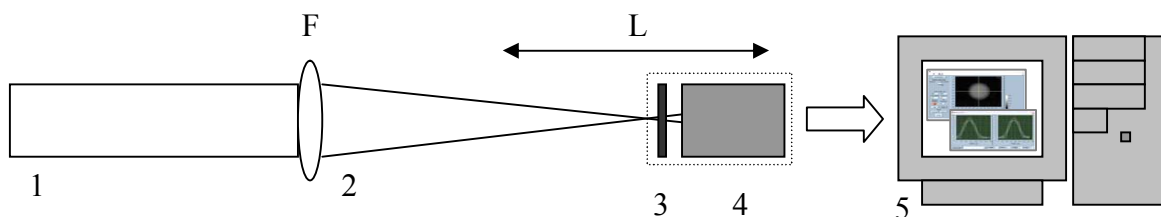


Рис. 1 Схема измерения профиля пучка полупроводниковой лазерной системы: 1- лазерное излучение, 2 – фокусирующая линза ($F=10$ см), 3 – система нейтральных фильтров (НС-13, НС-7), 4 – ПЗС-камера, 5 – компьютерная система ввода и обработки изображения.

Для проведения измерений параметров сфокусированного лазерного пучка в LabVIEW с использованием функций IMAQ был создан программный пакет, позволяющий в автоматическом режиме выполнять следующие действия:

1. вывод на экран монитора изображения сечения пучка, получаемого с помощью средств IMAQ в LabVIEW;
2. поиск центра масс пучка в каждом кадре с учетом вычета фоновой засветки и шума ПЗС-матрицы камеры;
3. симметризация изображения – обрезание кадра с центрированием изображения пучка;
4. визуализация профиля пучка в произвольном сечении;

5. измерение эллиптичности пучка, поиск диаметров пучка D_{ox} и D_{oy} ;
6. проведение нескольких таких измерений на фиксированном расстоянии от фокусирующей линзы с последующим усреднением значений и вычитанием фона;
7. измерение зависимости диаметра пучка от положения относительно линзы;
8. аппроксимация полученных данных гиперболической зависимостью;
9. нахождение параметра качества лазерного пучка M^2

Для контроля поперечной структуры лазерного излучения измеряется профиль интенсивности (плотности мощности) лазерного пучка, т.е. в общем случае зависимость $I(\vec{r})$, а в двумерном случае $I(x, y)$. Профиль же гауссовского пучка будет представлять собой зависимость вида $I(\vec{r}) = I(x, y) = I_0 \times \exp(-r^2 / r_0^2) = I_0 \times \exp(-\frac{x^2 + y^2}{r_0^2})$, где I_0 -

интенсивность в центре гауссовского пучка, а r_0 - начальный радиус гауссовского пучка.

После того, как лазерный пучок попадает на ПЗС-матрицу Fireware-камеры, на экране компьютера формируется изображение, представленное на рис.2, что и представляет собой распределение интенсивности в зависимости от (x,y), т.е. поперечный профиль лазерного пучка.

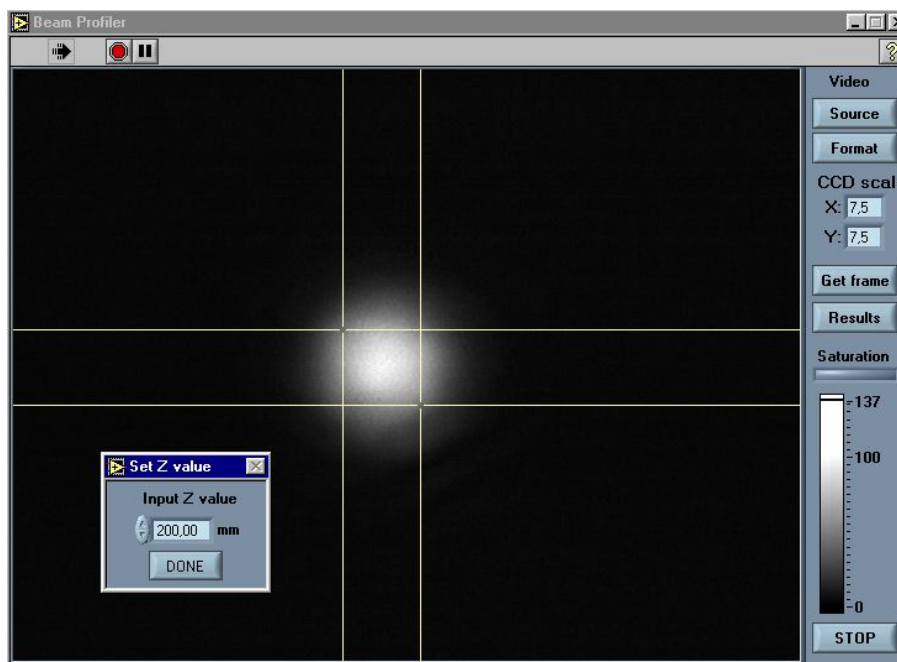


Рис.2 Изображение пучка He-Ne лазера.

Перемещая камеру вдоль пучка, можно прописать перетяжку лазерного излучения, получив зависимость диаметра пучка от расстояния вдоль его оси. Излучение хорошего He-Ne лазера имеет почти дифракционную расходимость при практически гауссовском профиле пучка. Излучение полупроводникового лазера имеет существенно худшую расходимость и профиль (см. Рис.3).

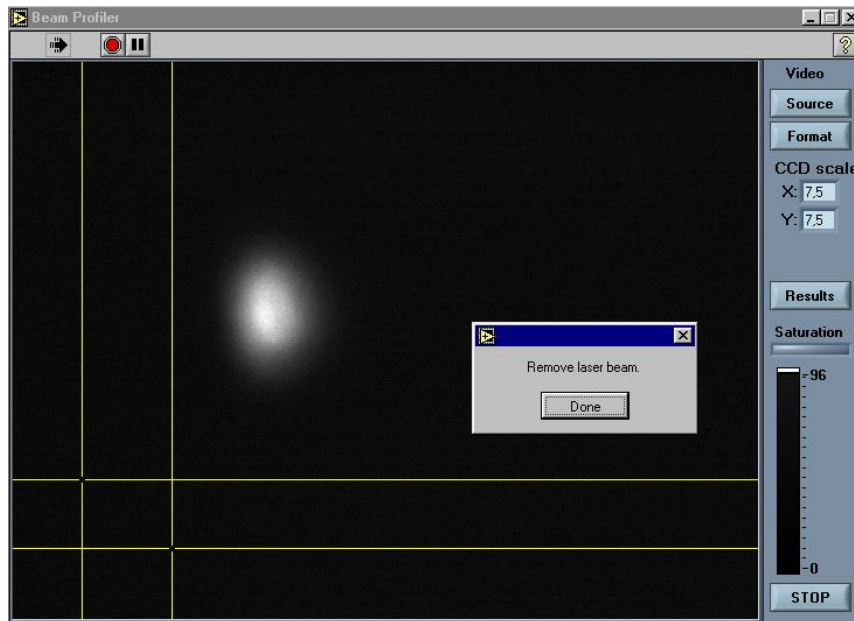


Рис.2 Изображение пучка полупроводникового лазера.

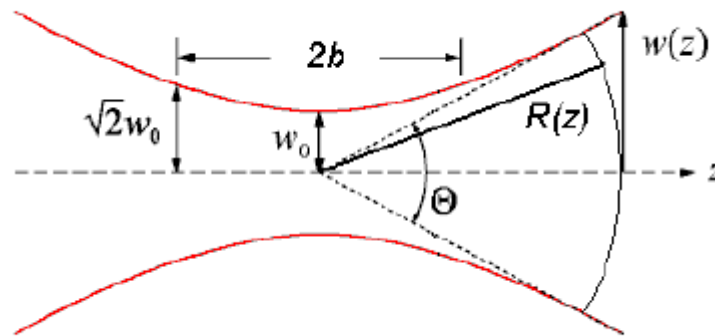


Рис.3 Продольный профиль гауссова пучка.

Из рис.3 и из анализа профиля лазерного пучка в произвольном сечении видно, что с изменением расстояния z , изменяется и радиус пучка, соответственно. Область, где радиус пучка изменяется в пределах от $\sqrt{2}w_0$ до w_0 называется перетяжкой, а длина этой области $2b$ – длиной перетяжки, радиусом перетяжки называется радиус пучка в этой области w_0 .

Волновая поверхность гауссовского пучка имеет кривизну волнового фронта:

$$R(z) = z \left(1 + \left(\frac{b}{z} \right)^2 \right)$$

откуда видно, что в перетяжке волновой фронт является плоским. На расстоянии радиус волновой поверхности стремится к радиусу сферической волны с центром в месте перетяжки: $R(z) = z$. Угловая расходимость равна $\theta = \frac{2w_0}{b}$. Видно, что эту расходимость можно понимать как появившуюся в результате дифракции на отверстии с радиусом порядка w_0 . Таким образом, при каждом положении камеры очень удобно производить измерение этих величин, включая и диаметры пучка D_{ox} и D_{oy} и эллиптичность лазерного пучка, которую мы будем определять, как $Q = \frac{D_{ox}}{D_{oy}}$.

При этом для полупроводниковых лазеров существует такой эффект, что до фокальной плоскости поперечный профиль пучка будет представлять собой эллипс, потом

при приближении к фокальной плоскости он начнёт сжиматься, при достижении её превратится в окружность, а после фокальной плоскости становится из вертикально-ориентированного, горизонтально-ориентированным. Последнее объясняется тем, что пучок, ввиду конечности плоскостей зеркал лазера, расходится. Из-за этого расхождения волна получается неплоская, но её можно описать, как плоскую, проходящую через некоторую апертуру. То есть, пучок диффрагирует, проходя через эту виртуальную апертуру. А дальше проще: чем шире исходный луч, тем уже диффракционная картина, и наоборот. То есть для самого широкого сечения эллипса получится самое узкое сечение изображения, а для самого узкого сечения эллипса будет самое широкое сечение изображения. Эллипс перевернётся! Единственно нужно сказать, для того, чтобы этот эффект был заметен, апертура должна быть маленькой, т. е. волна должна быть существенно неплоская. Главное, что если этот эффект существует, то измеряя в автоматическом режиме эллиптичность Q , мы сможем понять, где мы находимся по z : в фокальной плоскости, до или после неё. А зная основные параметры лазерной системы, без труда определить фокус и оптическую силу линзы.

Определение центра масс лазерного пучка также представляет собой интерес, т.к. измерение этого параметра определяет измерение всех остальных вышеописанных и интересующих нас величин, в том числе и параметра качества пучка M^2 , о котором мы скажем чуть ниже. По аналогии с механическими системами, где центр масс системы определяется как средне взвешенное значение, здесь можно записать, что:

$$X_{ц.м.}^n = \frac{\rho(x_0)x_0 + \rho(x_1)x_1 + \rho(x_2)x_2 + \dots + \rho(x_n)x_n}{\rho(x_0) + \rho(x_1) + \rho(x_2) + \dots + \rho(x_n)}, \text{ где } \rho(x) = \sum_{y=0}^{\infty} I(x, y)$$

$$Y_{ц.м.}^n = \frac{\rho(y_0)y_0 + \rho(y_1)y_1 + \rho(y_2)y_2 + \dots + \rho(y_n)y_n}{\rho(y_0) + \rho(y_1) + \rho(y_2) + \dots + \rho(y_n)}, \text{ где } \rho(y) = \sum_{x=0}^{\infty} I(x, y)$$

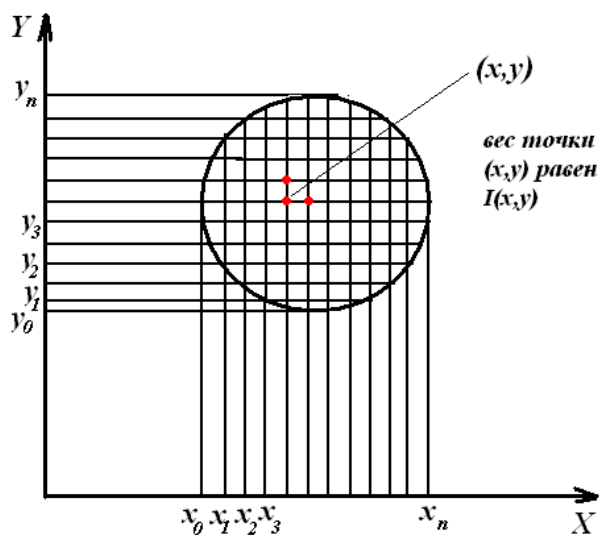


Рис.4 Модель для расчёта центра масс пучка.

Качество лазерного пучка может оцениваться различными методами. Одним из таких методов является оценка степени близости профиля исследуемого пучка к профилю гауссовского пучка. Для этой цели вводится параметр M^2 , который равен отношению диаметра перетяжки исследуемого пучка (по уровню интенсивности $1/e$) к диаметру перетяжки гауссовского пучка.

Согласно стандарту ISO 11146 алгоритм измерения параметра качества пучка M^2 предполагает 1) измерение диаметра пучка D (по уровню поля $1/e$) в пределах трех длин

Рэля (L_R= b/2, где b – длина перетяжки) относительно положения перетяжки пучка, 2) аппроксимацию полученных данных гиперболической зависимостью, 3) расчет M².

Перетяжка создается фокусирующей линзой с фокусным расстоянием 10 см. Основным критерием оптимальных параметров фокусирующей системы являлся минимальный размер пятна излучения на поверхности ПЗС-камеры. Уверенное измерение диаметра пучка возможно при регистрации диаметра не менее 15 пикселями ПЗС-матрицы видеокамеры, которая в нашем случае составляет 7 мкм. Перемещение ПЗС-камеры вдоль оси распространения пучка осуществлялось с использованием системы перемещения, управляемой контроллером шагового двигателя.

Диаметр гауссовского пучка зависит от расстояния по формуле:

$$D^2(z) = D_0^2 + (z - z_0)^2 \Theta^2 / 2,$$

где D₀ – ширина перетяжки пучка по уровню 1/e интенсивности, z₀ – положение перетяжки пучка, Θ - расходимость излучения. После аппроксимации экспериментально измеренной зависимости D(z) указанной выше функцией, впоследствии рассчитывается

параметр M² по формуле: $M^2 = \frac{\pi\sqrt{2}}{4\lambda} \cdot D_0\Theta$. Результаты измерения профиля фокусировки

и параметра качества пучка M² излучения He-Ne лазера приведены на рис.5.

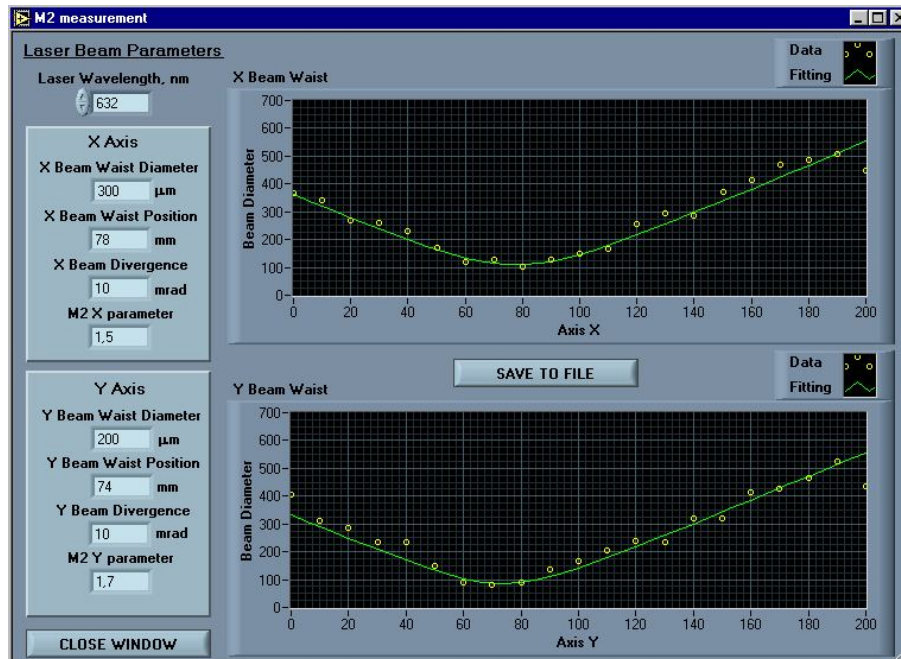


Рис.5 Результаты измерения параметра качества пучка M² излучения He-Ne лазера.