

Organische Halbleiterlaser auf Basis Photonischer-Kristalle

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

von der Fakultät für

Elektrotechnik und Informationstechnik

der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Diplom-Physiker Marc Stroisch

geb. in: Essen

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Juni 2007

Hauptreferent: Prof. Dr. U. Lemmer

Korreferent: Prof. Dr. J. Leuthold

Inhaltsverzeichnis

1	ZUSAMMENFASSUNG	1
2	EINLEITUNG	3
3	GRUNDLAGEN ORGANISCHER HALBLEITERLASER	5
3.1	Organische Halbleiter	5
3.1.1	Optische Eigenschaften organischer Halbleiter.....	7
3.1.2	Transfer-Systeme	10
3.1.3	Elektronische Eigenschaften organischer Halbleiter	11
3.1.4	Strukturkonzepte organischer Halbleiter	11
3.1.5	Stimulierte Emission in organischen Halbleitern	13
3.1.6	Gast-Wirtsystem Alq ₃ :DCM	14
3.1.7	Laser- und Wirtsmaterial Spiro-6-phenyl.....	16
3.2	Planare Wellenleiter	17
3.3	Resonatoren.....	19
3.3.1	Theorie der gekoppelten Wellen	19
3.3.2	Konzept der Photonischen-Kristalle.....	23
3.3.3	Auskopplungsmechanismen in einer Dimension	28
3.3.4	Entstehung von Fernfeldern	30
3.3.5	DBR-Laser	32
3.3.6	Weitere Resonatortypen	32
3.4	Optisches Pumpen	32
3.4.1	Einfluss der Pulslänge	33
3.4.2	Einfluss der Pump polarisation.....	33
3.4.3	Diodengepumpte Festkörperlaser (DPSS-Laser).....	33
3.4.4	Laserdioden	34
3.4.5	LEDs	34
3.4.6	Elektrisches Pumpen	34
4	HERSTELLUNGSPROZESSE	37
4.1	Herstellung von Resonatoren.....	37
4.1.1	Laserinterferenzlithografie	38
4.1.2	Elektronenstrahl-Lithografie	40
4.1.3	Direktes Laserschreiben	40
4.1.4	Selbstorganisierende Verfahren.....	41
4.1.5	Vervielfältigungstechniken	42
4.2	Probenherstellung.....	45
4.2.1	Probenpräparation	45
4.2.2	Aufdampfen.....	45
4.2.3	Aufschleudern	47

5	MESSPLÄTZE ZUR PROBENCHARAKTERISIERUNG.....	49
5.1	Lasercharakterisierung	49
5.1.1	Photolumineszenzmessungen	51
5.1.2	Ortsaufgelöste PL-Messungen.....	51
5.1.3	Laserschwelienmessung	52
5.1.4	Laserkennlinienmessungen.....	52
5.1.5	Winkelaufgelöste Messungen.....	53
5.2	Optische Gittercharakterisierung	56
6	DURCHSTIMMBARE LASER	59
6.1	Konzepte für durchstimmbare organische Laser	59
6.2	Variation der Gitterperiode.....	61
6.3	Durchstimmbare Laser auf Basis von Spiro-6-phenyl.....	63
6.3.1	Herstellungs- und Probenübersicht.....	63
6.3.2	Lasereigenschaften dotierter Spiro-6-phenyl-Laser.....	64
6.3.3	Lebensdauermessungen an Spiro-6-phenyl-Schichten	65
6.4	Homogene Hochindex-Schichten	68
6.4.1	Stand der Technik.....	69
6.4.2	Experimente.....	69
6.4.3	Experimentelle Ergebnisse	70
6.4.4	Wellenleitersimulationen der homogenen Hochindex-Schichten	72
6.4.5	Diskussion der Ergebnisse.....	74
6.4.6	Zusammenfassung und Ausblick.....	76
6.5	Schräg bedampfte Hochindex-Schichten	78
6.5.1	Stand der Technik.....	78
6.5.2	Experimente.....	79
6.5.3	Auswertung und Diskussion.....	80
6.5.4	Zusammenfassung und Ausblick.....	81
7	STRUKTURIERUNG DURCH LASERABLATION.....	83
7.1	Stand der Technik.....	84
7.2	Probenherstellung.....	85
7.3	Homogene Ablation	86
7.4	Interferenzablation	88
7.4.1	Homogenität der Ablation	88
7.4.2	Gittereffizienzen	89
7.4.3	Charakterisierung der Laser.....	90
7.4.4	Zusammenfassung und Ausblick.....	91
8	PHOTONISCHE-KRISTALL-RESONATOREN	93
8.1	Quadratische Gitter	93
8.1.1	Stand der Technik.....	93

8.1.2	Experimente	94
8.1.3	Laserschwellenmessungen an quadratischen Gittern	95
8.1.4	Fernfelder	101
8.2	Hexagonale Gitter.....	114
8.2.1	Stand der Technik.....	115
8.2.2	Probenübersicht.....	116
8.2.3	Rückkoppelungsmechanismen	116
8.2.4	Gitter mit einer Gitterperiode von 220 nm	117
8.3	Zusammenfassung	119
9	AUSBLICK.....	121
10	DANKSAGUNG	125
11	LITERATURVERZEICHNIS	127
12	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	135
13	ANHANG.....	137
13.1	Zeitaufgelöster Messaufbau	137
13.2	Weitere Daten der homogenen Hochindex-Schichten	138
13.3	Laserfächer in eindimensionalen Gittern	140
13.4	Umrechnung der Kikuchi-Linien in Winkelkoordinaten.....	141
13.5	Bandstrukturmessung an quadratischen Gittern	143
13.6	Weitere Fernfelder quadratischer Resonatoren	145
13.7	Gitter mit einer Periode von 440 nm.....	146
13.7.1	Stand der Technik.....	146
13.7.2	Probenübersicht.....	147
13.7.3	Rückkoppelungsmechanismen	147
13.7.4	Fernfelder	150
13.8	Gitter mit einer rechteckigen Symmetrie	152
13.8.1	Rückkopplungsmechanismen.....	152
13.8.2	Laserschwellen und –wellenlängen.....	154
13.8.3	Fernfelder	154
14	LEBENS LAUF	157

1 Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit Festkörperlasern auf Basis organischer Halbleiter. Ihr großer spektraler Durchstimmbereich, ihre vielseitige Prozessierbarkeit und die hohe Lumineszenzausbeute machen sie zu idealen Kandidaten für eine kostengünstige Laserquelle im gesamten sichtbaren Spektralbereich. Im Rahmen dieser Doktorarbeit wurden Photonische-Kristall-Resonatoren zur optischen Rückkopplung eingesetzt und die hergestellten Laser spektroskopisch untersucht.

Mit dotierten Spiro-6-phenyl-Schichten konnte Lasertätigkeit im spektralen Bereich zwischen 420 nm und 650 nm demonstriert werden. Hierbei wurde nur eine einzige Pumpquelle genutzt, was für kompakte integrierte Systeme von besonderem Interesse ist.

Ein neues Konzept zum Durchstimmen organischer Festkörperlaser mithilfe von Hochindexschichten wurde realisiert und demonstrierte einen spektralen Durchstimmbereich von 60 nm. Dieses Konzept bietet sich insbesondere für großflächige Lasersubstrate an und kann sowohl bei der Nutzung von aufgedampften Schichten als auch bei der Prozessierung aus der Flüssigphase genutzt werden. Bei weiteren Untersuchungen mit Hochindexschichten konnte zudem durch die Schrägbedampfung die photonische Bandstruktur gezielt verändert werden.

Das technologische Potenzial der direkten Strukturierung der Oberfläche mithilfe der Laserinterferenzablation wurde anhand des Lasermaterialsystems $\text{Alq}_3\text{:DCM}$ untersucht. Es konnten erfolgreich Laserresonatoren lokal ablatiert werden. Zusätzlich wurde die Ablationsschwelle für das Materialsystem durch die systematische Variation der Ablationsparameter bestimmt. Diese Technik ist neben dem Einsatz für elektrisch gepumpte Laser auch für hybride Systeme mit einer hohen Integrationsdichte interessant.

Durch die Variation der Säulendurchmesser zweidimensionaler Photonischer-Kristall-Resonatoren und durch die Anwendung unterschiedlicher Untersuchungsmethoden konnten die charakteristischen Lasermerkmale und ein optimaler Säulendurchmesser bestimmt werden.

Ein bei Versuchen mit oberflächenemittierenden Lasern auf Basis quadratischer Resonatorkonfiguration beobachtetes Fernfeld wurde systematisch untersucht. Die grundlegenden Mechanismen konnten durch ein Modell der TE-TM-Modenkopplung erklärt werden.

2 Einleitung

Die Nutzung künstlich erzeugten Lichtes findet in allen Bereichen des Alltags und der Wissenschaft statt. Für die Menschheit war die Erfindung der Glühlampe im 19. Jahrhundert ein Aufbruch zu vielen weiteren Formen künstlicher Lichtquellen. Neben den Leuchtstofflampen und den Hochdrucklampen sei hier nur noch die Leuchtdiode erwähnt, welche sich von einem kleinen, roten Leuchtpunkt zu einer Lichtquelle entwickelte, die bereits Einzug in Autoscheinwerfer fand.

Die bedeutendste Strahlungsquelle für die Wissenschaft ist die Erfindung des Lasers im Jahre 1960. Durch seine einzigartigen Eigenschaften ist er ein beliebtes Instrument zur Untersuchung von physikalischen und chemischen Prozessen – hier bringt er im übertragenen Sinne Licht ins Dunkel der Welt. Seine hervorragendsten Kennzeichen können eine spektral enge Emission, eine geringe Strahldivergenz, zeitliche und örtliche Kohärenz, extrem kurze Pulsdauern und hohe Leistungsdichten sein.

Im sichtbaren Spektralbereich bietet sich ein breites Einsatzgebiet für Laser an, ausgehend von der optischen Datenspeicherung über die optische Datenübertragung bis hin zur Analytik. Bei diesen Anwendungen sind niedrige Laserschwellen und die Durchstimrbarkeit von großer Bedeutung. Dadurch bestehen große Potenziale für organische Festkörperlaser auf Basis Photonischer-Kristalle, welche in dieser Arbeit behandelt werden.

Der erstmalige Einsatz von organischen Materialien in Lasern fand bereits in den 60er Jahren statt. Innerhalb dieses Jahrzehnts konnte mit ihnen Lasertätigkeit im und über den sichtbaren Spektralbereich hinaus gezeigt werden. Zudem wurde eine andere Stärke von organischen Materialien sichtbar: Die Möglichkeit, die Laserwellenlänge über einen großen Spektralbereich durchzustimmen. Der kommerzielle Einsatz von Farbstofflasern beschränkt sich bis heute jedoch auf die Flüssigkeitslaser.

Organische Festkörperlaser sind ein aktuelles Gebiet der Forschung. Neben der Realisierung eines elektrisch gepumpten Lasers stehen bei optisch angeregten Systemen neue Konzepte für die Durchstimrbarkeit und Strukturierung sowie die Integration in Anwendungen im Vordergrund. Mit Blick auf die Laserdiode sind dabei organische Halbleitermaterialien die bevorzugt eingesetzten Materialien.

In der Nutzung und Verarbeitung von organischen Materialien sind diese den anorganischen überlegen. So können organische Materialien großflächig und kostengünstig prozessiert werden, indem man sie aufschleudert, druckt, fotolithografisch strukturiert oder abformt. Zudem sind der Nutzung jeglicher Substrate, unter anderem auch flexibler Substrate, keine Grenzen gesetzt. Auch können durch die leichte Prozessierbarkeit eine Vielzahl von Laserresonatoren realisiert werden. Eine besondere Klasse stellen dabei Photonische-Kristall-Resonatoren dar.

Das Forschungsgebiet der Photonischen-Kristalle umfasst alle Materialien mit einem periodisch variierenden Brechungsindex. Solche Materialien wurden schon lange eingesetzt, aber erst mit den Veröffentlichungen von Yablonovitch und John im Jahre 1987 wurde ein allgemeineres Verständnis geschaffen und die potenziellen Einsatzmöglichkeiten solcher Kristalle erkannt [1][2]. Seitdem steigt das Interesse an diesem Forschungsgebiet stetig. Im Bereich der Laser sind vor allem zweidimensionale Kristalle von besonderem Interesse. Es gibt zudem zahlreiche Phänomene, welche noch nicht erklärt oder realisiert werden konnten.

Diese Arbeit beschäftigt sich systematisch mit organischen Festkörperlasern auf der Basis Photonischer-Kristalle. Nach einer Einführung in die Grundlagen organischer Laser wird in Kapitel 4 auf die allgemeine Herstellung eingegangen. Die genutzten Messplätze werden in Kapitel 5 vorgestellt. Den Einstieg in die experimentell durchgeführten Arbeiten gibt das Kapitel 6, welches die Durchstimmbarkeit der Laserwellenlängen und den Einsatz von schräg bedampften Hochindex-Schichten zur Beeinflussung der photonischen Bandstruktur behandelt. Die Herstellung von Resonatoren direkt in einem aktiven Wellenleiter durch Laserinterferenzablation wird in Kapitel 7 beschrieben. In Kapitel 8 werden Untersuchungen an verschiedenen zweidimensionalen Gittersymmetrien vorgestellt. Den Abschluss der Arbeit bildet das Kapitel 9 mit einem Ausblick auf den Einsatz von organischen Lasern.

3 Grundlagen organischer Halbleiterlaser

Das Akronym Laser (light amplification by stimulated emission of radiation) umschreibt die Lichtverstärkung von Strahlung durch stimulierte Emission. Laser bauen sich aus einem Licht verstärkenden Material, einem Resonator und einer Pumpquelle auf. In Bild 3.1 sind die Grundelemente und ein Schema des Regelkreises dargestellt. Die Eingangsleistung bzw. die benötigte Energie für das System wird von außen zugefügt. Dies kann elektrisch, optisch oder chemisch geschehen und wird als pumpen bezeichnet. Zur Lichtverstärkung selbst ist ein entsprechendes Material nötig, was auch als Lasermaterial oder aktives Material bezeichnet wird. Als drittes Element ist eine optische Rückkopplung nötig, welche einen Teil des verstärkten Lichtes erneut in das System zurückführt. Diese Rückkopplung wird durch den Laserresonator bewerkstelligt und besteht im einfachsten Fall aus zwei Spiegeln. Um die Laserstrahlung zu nutzen, koppelt ein Spiegel einen Teil der Laserstrahlung als Ausgangleistung aus.

Die beschriebenen drei Komponenten werden in den nächsten Abschnitten, anhand der in dieser Arbeit verwendeten Photonischen-Kristall-Laser auf Basis organischer Halbleiter, erläutert.

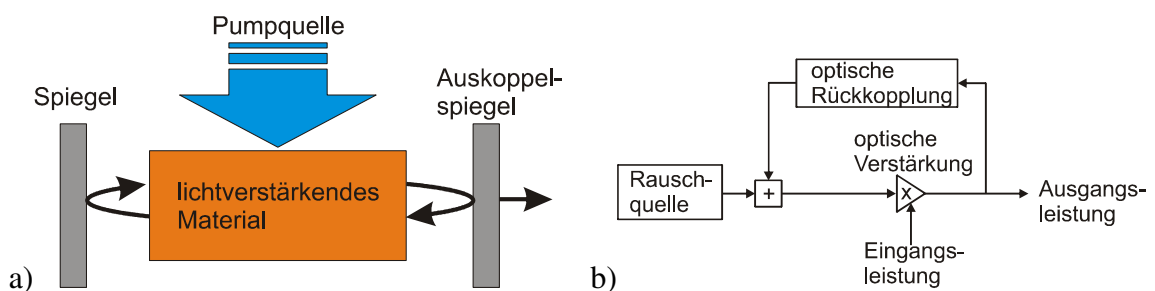


Bild 3.1: a) Grundelemente eines Lasers.
b) Schema der Lichtverstärkung mit den entsprechenden Einflussgrößen.

3.1 Organische Halbleiter

Im Folgenden wird ein Überblick über die Eigenschaften organischer Lasermaterialien gegeben. Dabei werden die physikalischen und chemischen Grundlagen erläutert, welche für eine Beschreibung von optischen, elektrischen und strukturellen Eigenschaften wichtig sind. Für ein in die Tiefe gehendes Verständnis bzw. für grundlegende Begriffe der Chemie sei auf die einschlägige Fachliteratur hingewiesen. So wird die Theorie der Hybridisierung in [3] erläutert und [4] gibt einen ausführlichen Überblick über Farbstofflaser und Laserfarbstoffe. Weitere Literatur wird an den entsprechenden Stellen zitiert.

Die Chemie versteht unter organischen Materialien im Wesentlichen die Klasse der Kohlenwasserstoffe. Ausnahmen sind Carbonate, Kohlensäure und ähnliche

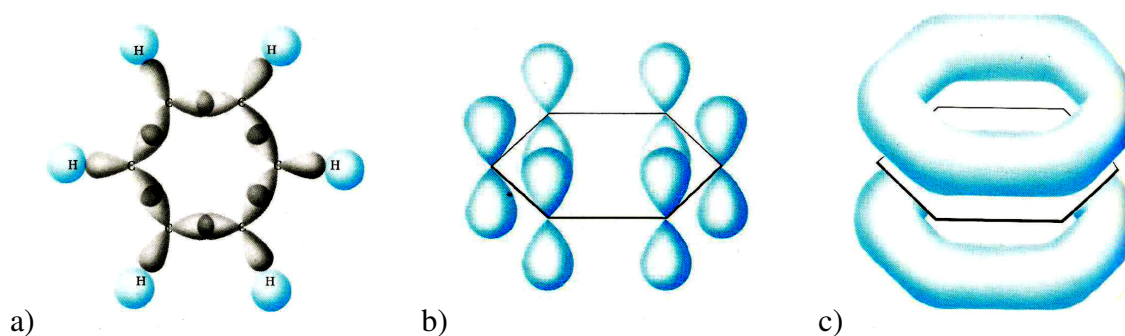


Bild 3.2: a) Die sp^2 -Orbitale der einzelnen Kohlenstoffatome überlappen sich und bilden die in der Molekülebene liegenden σ -Bindungen aus.
 b) Jedes Kohlenstoffatom behält ein $2p_z$ -Atomorbital, welches senkrecht zur Molekülebene steht.
 c) Die sechs $2p_z$ -Orbitale überlappen und es entstehen sechs π -Orbitale, von denen das bindende Niveau mit der niedrigsten Energie abgebildet ist.
 Bildquelle: [3].

Verbindungen. Zusätzlich kann man organische Materialien in gesättigte und ungesättigte Kohlenwasserstoffe aufteilen. Die ungesättigten Kohlenwasserstoffe besitzen mindestens eine Doppel- oder Dreifachbindung. Organische Verbindungen ohne Mehrfachbindungen absorbieren typischerweise erst unterhalb von 160 nm, was energetisch oberhalb der Dissoziationsenergie liegt. Sie würden durch die Anregung zerfallen, weshalb sie für Lasermedien nicht von Bedeutung sind.

Die zentralen optischen Eigenschaften von organischen Farbstoffen beruhen auf Elektronen, welche über dem Molekül delokalisiert sind. Die Delokalisation entsteht durch π -Bindungen, welche sich über zwei Atome hinweg erstrecken.

Das bekannteste Beispiel für ein delocalisiertes Elektronensystem ist der Benzolring C₆H₆. Er besteht aus sechs Kohlenstoffatomen, welche auf einem Sechseck in einer Ebene angeordnet sind. Alle Kohlenstoffatome besitzen ein sp^2 -Hybridorbital, welches für die σ -Bindungen mit den Nachbaratomen sorgt (s. Bild 3.2 a). Diese Bindungen befinden sich auf den Verbindungsachsen zwischen den einzelnen Atomkernen. Sie sind im Wesentlichen für das starre Grundgerüst des Moleküls verantwortlich. Jedes Kohlenstoffatom behält zudem ein $2p_z$ -Orbital, welches senkrecht zur Ebene des Benzolrings steht (s. Bild 3.2 b). Die sechs $2p_z$ -Orbitale überlappen sich mit ihren Nachbarn, wodurch eine ringförmige Elektronenverteilung ober- und unterhalb der Ebene entsteht, wie in Bild 3.2 c) zu sehen ist. Die Elektronen können sich innerhalb des Orbitals frei bewegen, weshalb man von delocalisierten Elektronen spricht.

In den zur Darstellung von chemischen Strukturen verwendeten Lewis-Formeln werden delocalisierte Elektronensysteme über Doppelbindungen dargestellt, welche von Einzelbindungen getrennt sind. Man spricht in diesem Zusammenhang dann von konjugierten Doppelbindungen bzw. von einem π -konjugierten System.

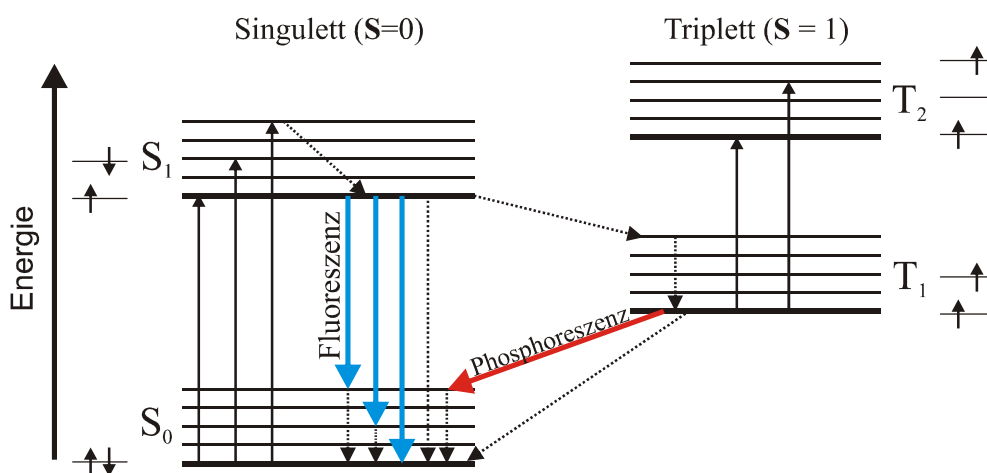


Bild 3.3: Vereinfachtes Termschema der elektronischen Zustände eines organischen Farbstoffes. Es sind jeweils die ersten beiden Singulett- und Triplett-Zustände mit der jeweiligen Spin-Konfiguration abgebildet. Absorption wird durch schwarze Pfeile dargestellt, strahlende Übergänge werden mit durchgezogenen Pfeilen und strahlungslose Prozesse durch gepunktete Linien dargestellt.

3.1.1 Optische Eigenschaften organischer Halbleiter

Betrachtet man das π -konjugierte System vereinfacht als ein freies Elektronengas, welches in einem Potenzialkasten gefangen ist, können die elektronischen Zustände der organischen Moleküle grob abgeschätzt werden. Die Breite des Potenzialkastens ist dabei durch die Länge des π -konjugierten Systems vorgegeben. Die Anzahl der Elektronen wird durch die freien Elektronen bestimmt. Analog zur Atomphysik kann jeder Zustand mit zwei Elektronen besetzt werden. Es bilden sich zudem ein Singulett und ein Triplett-Termschema aus. Beim Singulett ist der Gesamtdrehimpuls $S = 0$. Beim Triplett können die zwei Elektronen des Zustandes auf drei verschiedene Arten zum Gesamtdrehimpuls $S = 1$ kombinieren.

Zusätzlich spalten sich in organischen Materialien, aufgrund der hohen Anzahl von Atomen, die Zustände in zahlreiche vibronische Unterniveaus auf. In Bild 3.3 ist ein vereinfachtes Termschema für einen organischen Farbstoff aufgezeichnet. Die Singulett-Zustände sind mit S_i und die Triplett-Zustände mit T_i gekennzeichnet. Der Index gibt das jeweilige Energieniveau an. So handelt es sich zum Beispiel bei S_0 um den Grundzustand des Singulett-Zustandes, welcher gleichzeitig auch der energetisch niedrigste Zustand ist. Der niedrigste Zustand im Triplett-Schema ist T_1 und nicht T_0 , da ein Gesamtdrehimpuls von $S = 1$ zwei gleich ausgerichteter Spins bedarf und dies aufgrund des Pauliprinzips im Grundzustand nicht möglich ist. Dies geht erst ab dem ersten angeregten Zustand. Die Aufspaltung der Zustände durch vibronische Energieniveaus v ist durch zusätzliche Linien angedeutet. Eine weitere Aufspaltung durch Rotationszustände wurde nicht mitberücksichtigt.

Die Absorption geschieht zunächst aus dem Grundzustand S_0 heraus in höhere Singulett-Zustände bzw. deren Vibrationsniveaus (durchgezogene Linien). Innerhalb

eines Zustandes relaxiert das Molekül strahlungslos auf das energetisch niedrigste Vibrationsniveau (gepunktete Linie). Von dort kann es unter der Emission eines Photons zurück in den Grundzustand fallen (blaue Linie). Dieser Vorgang wird als Fluoreszenz bezeichnet und läuft auf einer Zeitskala zwischen 10^{-6} bis 10^{-12} s ab. Findet dieser Übergang strahlungslos statt, spricht man von interner Konversion (gestrichelte Linie). Die interne Konversion verschlechtert die Effizienz eines Lasers und ist deshalb für gute Laserfarbstoffe zu vermeiden.

Eine andere Möglichkeit ist die Interkombination vom Singulett-Zustand in den Triplett-Zustand. Dieser Prozess sollte aufgrund der Erhaltung des Gesamtdrehimpulses verboten sein. Jedoch findet dieser Prozess aufgrund von internen wie externen Störungen statt. Ist dieser Zustand angeregt, kann er wieder in den Grundzustand emittieren (Phosphoreszenz) oder strahlungslos relaxieren. Es kann allerdings auch zur Triplett-Triplett-Absorption kommen. Diese liegt häufig im Spektralbereich der Fluoreszenz und stellt somit einen unerwünschten Konkurrenzprozess bei der Lasertätigkeit dar. Da zudem der Zustand T_1 sehr langlebig ist (10^{-3} bis 10^2 s), akkumuliert der Zustand auch Elektronen. Dies gestaltet den Betrieb von kontinuierlich emittierenden Farbstofflasern als sehr schwierig. Daher muss das Lasermaterial im Resonator ständig erneuert werden. Dies geschieht durch das Fließen der Farbstofflösung oder dem Bewegen des Substrates [5].

Das Termschema aus Bild 3.3 ist nur eine erste Näherung. Betrachtet man zusätzlich, dass sich im angeregten Zustand die Kernabstände vergrößern, erhält man ein Schema, wie es in Bild 3.4 zu sehen ist. Das Schema wird Potenzialkurvendarstellung genannt.

Die Übergangswahrscheinlichkeit für einen gleichzeitigen Elektronen- und Schwingungsquantensprung kann mit dem *Frank-Condon*-Prinzip beschrieben werden. Eine Grundüberlegung davon ist, dass sich während des (schnellen) Übergangs der Elektronen die Kernabstände aufgrund ihrer wesentlich höheren Masse nicht ändern. Das heißt, die Übergänge in der Darstellung verlaufen immer senkrecht. Die Wahrscheinlichkeit für solche Übergänge ist dann groß, wenn die quantenmechanischen Eigenfunktionen beider beteiligten Zustände Maxima besitzen. Mithilfe dieses Prinzips können die intensivsten Übergänge, also die Maxima in Absorption und Emission, erklärt werden.

Das *Frank-Condon*-Prinzip ist in Bild 3.4 angewandt. Auf der rechten Seite sind dazu die Absorptions- und Emissionsspektren skizziert. Die Spektren liegen spiegelsymmetrisch zueinander, wenn die Abstände der Schwingungsniveaus der beteiligten Zustände identisch sind. Dies kann bei vielen Farbstoffen beobachtet werden. Die Verschiebung zwischen Absorptions- und Emissionsmaximum wird *Stokes*-Verschiebung genannt. Sie sollte für organische Lasermaterialien möglichst groß sein, damit es nicht zur Selbstabsorption kommt.

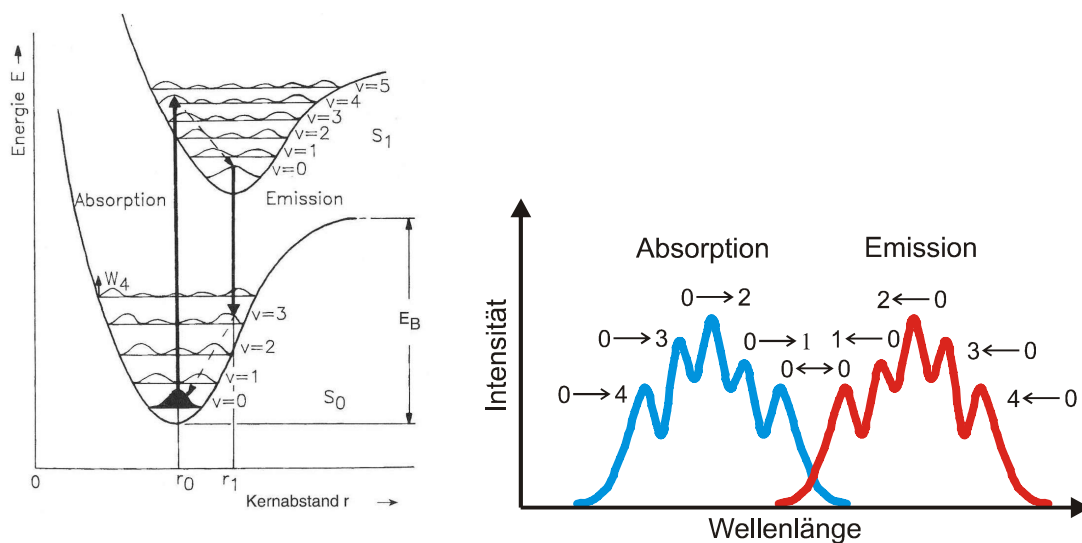


Bild 3.4: Übergänge nach dem Frank-Condon-Prinzip in der Potenzialkurvendarstellung [6]. Rechts sind ein Absorptions- und ein Emissionsspektrum dargestellt. Die mit dem Frank-Condon-Prinzip erkläraren Übergänge zwischen den Schwingungsniveaus sind ebenfalls gekennzeichnet.

Das Absorptionsspektrum stabiler organischer Farbstoffe ist auf den Bereich von circa 220 nm bis 1,0 μm begrenzt. Die Gründe dafür sind ausführlicher in [4] beschrieben und werden hier nur verkürzt wiedergegeben.

Für die untere Abschätzung betrachtet man ein System aus zwei konjugierten Doppelbindungen. Im Bild eines Potenzialkastens bedeutet dies eine geringe Breite des Potentials und somit große elektronische Energieabstände. Das System würde bei einer entsprechenden Abschätzung sein Absorptionsmaximum bei 220 nm besitzen. Durch die oben beschriebene Rotverschiebung des Emissionsmaximums ist davon auszugehen, dass organische Materialien minimal bei circa 250 nm emittieren werden. Für eine einfache Doppelbindung besteht wiederum die Einschränkung, dass das Molekül durch die Absorptionsenergie dissoziiert.

Im langwelligen Spektrum liegt die Grenze für die Absorption bei ungefähr 1,0 μm für einen stabilen organischen Farbstoff. Der Abschätzung liegt die Tatsache zugrunde, dass bei einer Absorptionswellenlänge von 1,0 μm der erste angeregte Singulett-Zustand S_1 energetisch sehr niedrig liegt. Der energetisch noch tiefer liegende metastabile Triplett-Zustand T_1 kann dann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit thermisch angeregt werden. Dieser Zustand weist zwei ungepaarte Elektronen auf und ist somit chemisch gesehen biradikal. In diesem hochreaktiven Zustand reagiert der Farbstoff sehr schnell mit seiner Umgebung und zerfällt zu anderen Produkten.

Einige Prozesse, welche die Fluoreszenz auslöchen können, wurden oben bereits beschrieben. Ein weiterer Prozess ist die sogenannte Konzentrationsauslöschung. Sie beschreibt das Phänomen, dass durch Erhöhung der Laserfarbstoffkonzentration, zum Beispiel in einer Lösung, die Fluoreszenz abnimmt. Als Faustregel für das Einsetzen der Abnahme gilt, dass der Abstand der Moleküle unterhalb von 10 nm ist. Dies ist ein