

Diss. ETH Nr. 16080

**Development of a Dosimetric Phantom with 400
pointlike Scintillators coupled to Optical Light
Guides for 3D Verification Dosimetry for Scanned
Proton Beam**

Dissertation for the degree of

DOCTOR OF THE NATURAL SCIENCE

of the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH, SWITZERLAND

Presented by

SAIROS SAFAI
Dipl. Phys. ETH

Born on January 15, 1976
Citizen of Lugano / TI, Switzerland

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. R. Eichler, examiner
Prof. Dr. P. Niederer, co-examiner
Dr. Eros Pedroni, co-examiner

2005

Abstract

The Paul Scherrer Institut (PSI) is still the only centre in the world capable of applying proton radiotherapy with a spot-scanning technique by means of a dedicated beam delivery system (gantry). The RT scientific community, which essentially groups radio-oncologists and physicists specialized in this particular science branch, has noted the advantages that such a technique could bring for the treatment of certain tumors and new facilities dedicated to this particular type of therapy are currently under construction or in planning in several countries in the world. The 3D superposition of modulated proton pencil beams characterizes the spot-scanning technique and is an excellent tool to provide intensity modulated proton radiotherapy (IMPT), which is particularly indicated, or even compulsory, when critical organs (e.g. the spinal cord) must be spared from radiation. In this case the dose homogeneity required for the target volume is obtained by the superposition of inhomogeneous dose fields applied under different angles. The number of patients that received IMPT at PSI is constantly increasing since 2002 and in 2004 more than 20% of the patients have been treated totally or partially with such a therapy. In order to ensure an optimal therapeutic course quality, it is necessary, among others, to develop tools that are able to measure and verify the complex dose distribution before it is applied to the patient. Such tools should be able to verify dose plans in 3D providing information concerning the behavior of the dose both laterally and in depth preferably with one single measurement. With the presently used dosimetry system, this is possible only by repeating the measurement several times with different setups. But then both the data taking and data analysis are extremely time consuming, limiting thus the application.

Therefore, in this work a dosimetry system, unique of its kind, was developed for 3D dose verification. The system consists in 400 dose detectors distributed in a Polyethylene phantom. Each detector consists in a small cylindrical scintillating volume coupled to an optical fibre with 2 mm diameter. The optical fibre transports the signal from the scintillator to a CCD camera for signal reading. The scintillating volume has a dimension of only 0.005 cm^3 . The system was developed in a way to allow modifying the distribution of the sensors within the phantom as much as one likes. The minimum possible distance between two neighbor scintillators is 8 mm and the total covered volume is $15.6 \text{ cm} \times 13.2 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$. The system was tested choosing a detector configuration that allows to verify simultaneously profiles lateral and in depth when the

gantry is in vertical position. Therefore, in this particular case, the 400 sensors lie on two oblique planes relative to the direction of the proton beam, in this sense we can speak of a quasi-3D dosimetry. Reproducibility measurements have shown that the system is very reliable (relative standard deviation of about 0.2% at 0.6 Gy). The results of the verification of IMPT plans with the new system are very promising (standard deviation less than 1.35% from the planned dose). The fibre phantom turned out to be an efficient instrument, able to verify not only complex planned dose distributions but also the performance of the dose delivery system.

In the first part of the thesis the scintillating materials used in the realization of the sensors were investigated, with the result that inorganic scintillating powders were chosen. During this phase a new scintillating powder mixture was developed, which has ideal characteristics for proton dosimetry. It consists of a mixture of $Gd_2O_2S:Tb$ and $(Zn,Cd)S:Ag$. Both phosphors have a high emission efficiency but contrasting behaviour in the Bragg peak region. The efficiency of $Gd_2O_2S:Tb$ decreases with increasing stopping power (quenching of luminescence) while that of $(Zn,Cd)S:Ag$ increases. Therefore the measured peak-to-entrance ratio can be modulated simply by modifying the ratio of the two powders in the mixture. Interestingly, this could be exploited in order to make a detector that can simulate, to some extent, the biological response of irradiated tissues. As the biologically effective dose is also enhanced in areas of high ionization density (i.e. in the Bragg peak), increasing the proportion of $(Zn,Cd)S:Ag$ could allow us to produce a phosphor that exactly matches the biological response for a given biological end point and model. For protons a *constant* RBE (relative biological effectiveness) value of 1.1 is usually used for clinical application, thus we looked for the optimal phosphors' ratio that reproduces perfectly the Bragg curve measured with ionization chambers.

After the realization of the new mixture a procedure was developed for the production of single detectors consisting in a scintillating head glued to an optical fibre by means of optical cement. The fibre detector can be used as single mobile tool for dosimetry (potential use for *in vivo* dosimetry) or, together with a considerable number of similar sensors, be employed in the realization of phantoms, as the one presented in this work, for the verification of complex 3D dose distributions.

Riassunto

L'istituto Paul Scherrer (PSI) rimane ancora l'unico centro al mondo in grado di applicare la terapia a protoni con la tecnica dello *spot-scanning* tramite un'unità specifica di trattamento isocentrica (*gantry*). La comunità scientifica in radioterapia, che essenzialmente raggruppa radio-oncologi e fisici specializzati in questo particolare ramo della scienza, ha constatato il vantaggio che tale tecnica può portare nella cura di determinati tumori e nuovi centri dedicati a questo particolare tipo di terapia sono attualmente in costruzione o in progettazione in diversi paesi del mondo. La sovrapposizione tridimensionale di fasci modulati filiformi di protoni contraddistingue la tecnica di *spot-scanning* ed è uno strumento eccellente per l'applicazione della terapia a protoni ad intensità modulata (IMPT), la quale è particolarmente indicata, e a volte assolutamente necessaria, quando organi a rischio (e.g. il midollo spinale) devono essere risparmiati dalla radiazione. In questo caso l'omogeneità della dose richiesta per il volume bersaglio è ottenuta dalla sovrapposizione di campi di dose disomogenei applicati sotto angoli diversi. Il numero di pazienti a cui è stato applicato l'IMPT al PSI è in costante aumento dal 2002 e nel 2004 più del 20% dei pazienti è stato trattato totalmente o parzialmente con tale terapia. Per garantire uno svolgimento terapeutico ottimale e di qualità, sono necessari, tra le altre cose, strumenti in grado di misurare e verificare la complessa distribuzione di dose prima che essa venga applicata al paziente. Tali strumenti dovrebbero essere in grado di verificare i piani di terapia in tre dimensioni fornendo informazioni dell'andamento della dose sia lateralmente che in profondità preferibilmente con una singola misura. Con gli strumenti finora a disposizione, ciò è possibile unicamente ripetendo le stesse misure più volte con *setup* diversi. Ma sia la presa dati come pure l'elaborazione degli stessi risultano estremamente dispendiosi in termini di tempo limitandone l'applicazione.

Perciò, in questo lavoro è stato sviluppato un sistema di dosimetria unico nel suo genere in grado di eseguire una verifica della dose a 3 dimensioni. Il sistema consiste in 400 rilevatori di dose distribuiti in un fantoccio di polietilene. Il singolo sensore è composto da un piccolo volume cilindrico scintillante connesso ad una fibra ottica di 2 mm di diametro. La fibra ottica trasporta il segnale dallo scintillatore ad una camera CCD per la lettura del segnale stesso. Il volume scintillante ha una dimensione di soli 0.005 cm³. Il sistema è stato costruito in modo tale da permettere di modificare a piacimento la

distribuzione dei sensori all'interno del fantoccio. La distanza minima permessa tra due scintillatori adiacenti è di 8 mm ed il volume complessivo ricoperto è di 15.6 cm × 13.2 cm × 8 cm. Il sistema è stato testato scegliendo una configurazione dei rilevatori che permetta la verifica contemporanea di profili laterali ed in profondità quando la *gantry* è in posizione verticale. Perciò, in questo caso particolare, i 400 sensori giacciono su due piani obliqui rispetto all'orientamento del fascio di protoni, in questo senso possiamo parlare di una dosimetria "quasi" a 3D. Misure di riproducibilità hanno dimostrato che il sistema è molto affidabile (deviazione *standard* relativa di circa 0.2% per 0.6 Gy). I risultati della verifica di piani IMPT con il nuovo sistema sono molto promettenti (deviazione *standard* inferiore ad 1.35% rispetto alla dose pianificata). Il fantoccio di fibre si è quindi rivelato essere uno strumento efficace, capace di verificare non solo piani di terapia complessi ma pure la *performance* dell'unità d'applicazione del fascio.

Nella prima parte della tesi è stato esaminato il materiale scintillante da applicare nella costruzione dei sensori preferendo polveri scintillanti inorganiche. Durante questa fase è stata sviluppata una nuova miscela di polveri scintillanti che presenta delle caratteristiche ideali per la dosimetria con protoni. Essa consiste in una miscela di Gd₂O₂S:Tb e (Zn,Cd)S:Ag. Entrambi i fosfori hanno un'ottima efficienza d'emissione ma si comportano in maniera opposta nella regione del picco di Bragg. L'efficienza di Gd₂O₂S:Tb decresce con il crescere della densità di ionizzazione (*quenching* di luminescenza) mentre quella di (Zn,Cd)S:Ag cresce. Perciò il rapporto picco-ingresso (*peak-to-entrance ratio*) misurato può essere modulato semplicemente controllando il rapporto delle due polveri nella miscela. Questo può essere sfruttato per ottenere un rilevatore che simula la risposta biologica dei tessuti irradiati. A causa del fatto che la dose biologica efficace è influenzata nelle regioni ad alta densità di ionizzazione (picco di Bragg), l'aumento della proporzione di (Zn,Cd)S:Ag permette di produrre un fosforo che riproduce la risposta biologica di un dato modello biologico. Per i protoni normalmente si usa un valore RBE (efficacia biologica relativa) *costante* di 1.1, perciò abbiamo cercato il rapporto ottimale che riproduca fedelmente la curva di Bragg misurata con le camere a ionizzazione.

Dopo la messa a punto della nuova miscela è stata sviluppata una procedura per la realizzazione del singolo sensore composto da una testa scintillante incollata ad una fibra ottica tramite del cemento ottico. Il rilevatore può essere utilizzato come singolo strumento mobile di dosimetria (per esempio per dosimetria *in vivo*) oppure, assieme ad un numero cospicuo di rilevatori simili, essere impiegato nella realizzazione di fantocci come quello presentato in questo lavoro per la verifica a 3D di distribuzioni di dosi complesse.